

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-20

中红外半导体光放大器研究进展

赵新龙^{1,2}, 刘 鹏^{1,2}, 徐 浩^{1,2}, 左成龙^{1,2}, 郑显达^{1,2}, 方思学^{1,2},
王延靖^{1,2}, 李晋平^{1,2}, 陆寰宇^{1,2}, 汪丽杰^{2,3}, 佟存柱^{2,3}, 孟 博^{1,2*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130031)

摘要: 中红外波段(2–12 μm)覆盖众多分子的特征吸收峰, 被誉为“分子指纹区”, 在环境监测、生物医学诊断、空间通信及国防安全等领域具有不可替代的战略价值。半导体光放大器(SOA)作为中红外光子系统的核心有源器件, 凭借其结构紧凑、电光转换效率高、增益带宽大及可集成性强等突出优势, 已成为中红外光源功率放大与信号处理的关键技术载体。本文首先阐述了中红外半导体光放大器的研究背景与发展脉络, 随后按照增益介质材料体系分类, 系统综述了InP基、GaSb基以及CdTe基、ZnS/ZnSe基、InAs基等其他新型中红外半导体光放大器的研究进展, 深入分析了不同类型增益介质的工作原理、器件结构、增益特性、集成方案及其应用限制, 最后对中红外半导体光放大器的技术发展趋势和未来研究方向进行了展望, 旨在为中红外光子系统的器件选型与技术创新提供理论参考。

关 键 词: 中红外; 半导体光放大器; InP基; GaSb基; 量子级联

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3724/CJL.20260228

CSTR: 32170.14.CJL.20260228

Research Progress of Mid-Infrared Semiconductor Optical Amplifiers

ZHAO Xinlong^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, XU Hao^{1,2}, ZUO Chenglong^{1,2}, ZHENG Xianda^{1,2}, FANG Sixue^{1,2},
WANG Yanjing^{1,2}, LI Jinping^{1,2}, LU Huanyu^{1,2}, WANG Lijie^{2,3}, TONG Cunzhu^{2,3}, MENG Bo^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, 130033 Changchun, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. JLight Semiconductor Technology Co., Ltd., Changchun 130031, China)

* Corresponding Author, E-mail: mengbo@ciomp.ac.cn

Abstract: The mid-infrared spectral band (2–12 μm) covers the characteristic absorption peaks of numerous molecules and is known as the “molecular fingerprint region”. It holds irreplaceable strategic value in environmental monitoring, biomedical diagnostics, space communications, and national defense security. Semiconductor optical amplifiers (SOA), as core active devices in mid-infrared photonic systems, have become key technology carriers for mid-infrared light source power amplification and signal processing, owing to their compact structure, high electro-optical conversion efficiency, large gain bandwidth, and excellent integrability. This paper first describes the research background and development history of mid-infrared SOA. Then, classified by gain medium material systems, it systemat-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62434009, 62304225, 62134008, 62435001); 吉林省科技发展计划(20260101004JJ); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国际合作基金(2025010986); 长春市科技发展计划项目(24SH08); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所科教合作基金项目(2025010920)

National Natural Science Foundation of China (62434009, 62304225, 62134008, 62435001); Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province, China (20260101004JJ); International Fund Program of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (2025010986); Science and Technology Development Plan Project of Changchun City, China (24SH08); Science-Education Cooperation Fund Program of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (2025010920)

ically reviews the research progress of InP-based, GaSb-based, and other novel mid-infrared SOA including CdTe-based, ZnS/ZnSe-based, and InAs-based devices. The working principles, device structures, gain characteristics, integration schemes, and application limitations of different gain media are analyzed in depth. Finally, the technical development trends and future research directions of mid-infrared SOA are prospected, aiming to provide theoretical references for device selection and technological innovation in mid-infrared photonic systems.

Keywords: mid-infrared; semiconductor optical amplifier; InP-based; GaSb-based; quantum cascade

1 引 言

半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)是一种基于半导体增益介质的有源光电子器件,通过受激辐射机制实现光信号的直接放大,具有结构紧凑、电光转换效率高、增益带宽大、响应速度快及可集成性强等显著优势,在光纤通信、光学传感、激光雷达及光谱分析等领域展现出广阔的应用前景。近十年来,近红外波段(1.3-1.55 μm)SOA的研究已取得长足进步,研究者们围绕量子点结构的超快增益恢复与低噪声特性展开深入探索,通过应变量子阱设计实现了宽带低偏振敏感的光放大,并借助高密度集成技术显著提升了器件的集成度与功能多样性^[1-4]。这些研究成果有效拓展了SOA的增益带宽、优化了噪声系数与光束质量,并为其向中红外等更长波长波段的延伸奠定了坚实的材料与工艺基础^[5]。

随着中红外光谱技术在痕量气体检测、生物医学诊断、自由空间通信及红外对抗等领域的快速发展,对高性能中红外光源的需求日益迫切。半导体光放大器作为构建中红外光子系统的核心功能器件,可直接对中红外信号进行高增益放大与功率提升,是实现片上集成中红外光源的关键使能技术^[6-7]。然而,将SOA技术拓展至中红外波段面临严峻挑战:一方面,传统InP基InGaAs量子阱材料受限于固有带隙,难以直接覆盖3 μm 以上波长范围;另一方面,中红外波段材料的本征光学损耗显著增大、热管理难度加剧,且光束质量控制更为复杂,这些因素共同制约了中红外SOA的器件性能与实用化进程。为突破上述瓶颈,研究者们积极探索GaSb基、II-VI族硫系化物、InAs量子点等新型材料体系,并结合能带工程、异质集成等先进器件结构优化手段,不断推动中红外SOA的性能边界拓展^[8-9]。

针对中红外SOA的材料带隙瓶颈与器件性能制约,当前的研究主要围绕四大技术路径展开。

其一,材料体系拓展:在InP基材料体系方面,针对2.0-2.5 μm 过渡波段,研究者们通过异质集成技术将InGaAs/InP SOA与绝缘体上硅(SOI)光子平台相结合,利用成熟的硅光子学工艺实现了紧凑高效的光放大功能;针对3-5 μm 大气窗口波段,则采用量子级联光放大器(QCL-SOA)结构,基于导带子带间跃迁机制突破了材料带隙限制,实现了宽谱大功率输出。其二,硅基非线性放大:依托硅基波导的受激拉曼散射与四波混频效应,可在2-5 μm 波段实现宽带片上光放大,为硅基中红外光子系统提供重要补充。其三,新型材料开发:GaSb基材料体系凭借较窄的固有带隙,在2-4 μm 短波中红外范围展现出显著优势,基于Type-II InAs/GaSb量子阱和超晶格结构的SOA通过能带工程设计有效增强了电子-空穴波函数重叠,显著提高了增益效率,并结合异质集成技术实现了与硅基平台的高效耦合。其四,变革性增益机理探索:过渡金属掺杂CdTe/CdSe、ZnS/ZnSe等II-VI族硫系化物半导体依靠离子内部d-d能级跃迁,可实现3-6 μm 超宽带光放大,为高功率飞秒脉冲放大提供了全固态解决方案;而InAs量子点及低维异质结结构则凭借三维载流子限域效应与可裁剪的能带排列,有效增强了峰值光学增益并抑制了非辐射损耗,为突破中红外增益瓶颈、拓展工作波段至6 μm 以上提供了创新的技术途径。

基于上述分析,本文按照增益介质材料体系的分类,系统综述了InP基(包括InGaAs/InP量子阱SOA与QCL-SOA)、GaSb基(包括Type-II量子阱与超晶格SOA)及其他新型材料体系(CdTe基、ZnS/ZnSe基、InAs基量子点等)中红外半导体光放大器的最新研究进展。文章深入梳理了不同材料体系对应的器件结构设计、增益特性优化、片上集成方案及其在实用化进程中面临的性能限制与技术挑战,并在此基础上对中红外SOA的未来发展方向进行了展望,以期为中红外光子系统的器件选型与技术创新提供有价值的理论参考与实践指导。

2 InP基半导体光放大器

InP基材料体系拥有成熟的金属有机物气相外延(MOVPE)、分子束外延(MBE)生长技术,可实现高质量量子阱、波导结构的原子级可控制备,同时完全兼容光刻、干法刻蚀、选区再生长、掩埋异质结等标准化半导体工艺,可实现批量化、低成本的器件制备^[10-12]。此外,InP衬底具备高导热系数,可有效降低SOA工作时的热积累,抑制热效应导致的增益谱红移、增益下降与器件性能退化,提升放大器的连续波工作能力与长期稳定性^[11,13]。同时,InP基衬底可与InGaAs、InGaAsP、AlGaInAs等多种合金体系实现晶格匹配,通过调控材料组分与量子阱应变,可实现带隙的连续可调,可覆盖1.55 μm 光通信波段至2 μm 以上中红外波段,适配SOA的波长设计需求^[10-11]。

2.1 2–3 μm 波段 InGaAs/InP 量子阱 SOA

2–3 μm 是中红外光子传感与通信的核心应

用波段,InGaAs/InP应变量子阱是该波段SOA的主流有源材料体系,辅以Sb元素掺杂可将工作波长拓展至2.3 μm 附近,是早期中红外集成光子学放大器件的核心研究载体,为片上集成式中红外信号放大提供了关键材料支撑。

2 μm 波段 InGaAs/InP SOA 的研究经历了从材料制备到片上集成的快速发展过程。2013年,Latkowski^[14]等人面向有源无源集成平台需求,该团队采用铟辅助MOVPE制备含4个InGaAs(Sb)量子阱的有源层,利用可变条带长度法完成脊波导中红外SOA小信号模式增益测试,在19 $^{\circ}\text{C}$ 、3.5 kA/cm^2 注入电流密度下获得峰值波长2071 nm、幅值7 cm^{-1} (15.2 dB)的小信号模式增益,3 dB带宽达27 nm,2 μm 脊波导InGaAs/InP(Sb)SOA的典型增益谱如图1(a)所示,直接验证了InGaAs/InP(Sb)材料体系在2 μm 波段实现有源与无源单片集成的可行性,为后续硅基异质集成提供了核心材料依据。

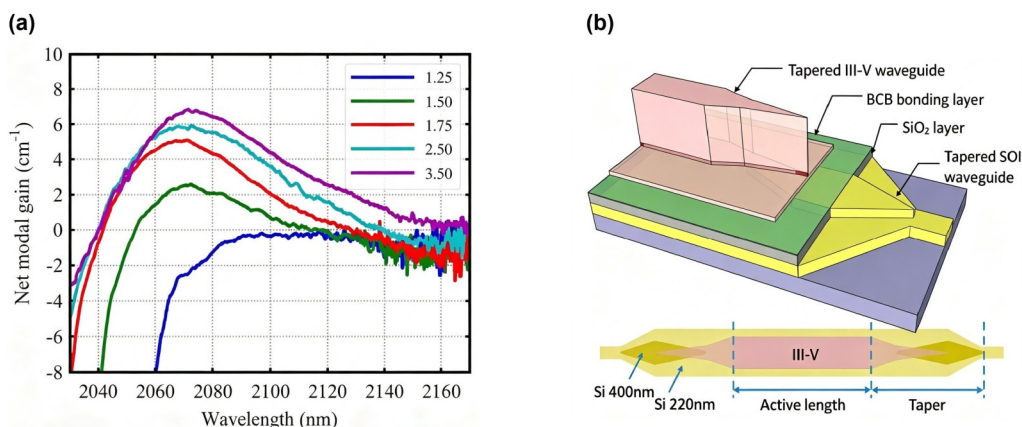


图1 (a)2 μm 脊波导InGaAs/InP(Sb) SOA增益谱^[14];(b)基于混合III-V/硅SOA的原理图(上)和顶视图(下)^[17]。

Fig.1 (a) Gain spectrum of 2 μm ridge waveguide InGaAs/InP(Sb) SOA; (b) Schematic (top) and top view (bottom) of hybrid III-V/silicon SOA.

在集成器件性能优化与平台化方面,2023年,Shi^[17]等人在硅基异质集成半导体光放大器的综述研究中明确了波段材料分工:InP基InGaAs量子阱SOA可稳定覆盖2–2.3 μm 波段,GaSb基SOA则能将工作窗口拓展至2–3 μm 全范围;依托晶圆键合、倒装芯片、微转移印刷等异质集成工艺,可实现InP基SOA与硅基光子集成电路(PIC)的单片集成,混合III-V/硅SOA的原理图如图1(b)所示,直观呈现了InP基SOA与硅基PIC依托晶圆键合、倒装芯片、微转移印刷等异质集成工艺实现单片集成的架构设计及其关键工艺模块。这些工作串起了2 μm InP基SOA在硅基异质集成

方面的发展主线——从最初验证片上增益,到优化热管理和输出功率,再到与标准化光子集成电路的深度融合,脉络清晰,步步推进。

在波导结构与饱和功率优化方面,2024年,Zhang^[56]等人研制出基于锥形波导结构的低偏振宽带SOA,通过结合应变量子阱与锥形脊波导设计,在O-band实现了80 nm的3 dB增益带宽与超过22 dBm的输出功率,其通过波导结构优化实现高增益与宽带宽协同的思路,为中红外波段宽带SOA的波导设计提供了重要参考。2025年,Heck^[53]等人提出了一种具有纵向变化限制因子的能量高效型半导体光放大器,通过采用锥形波导

设计,在输入端实现高增益而在输出端实现高饱和功率与低损耗,相比现有设计可将饱和输入功率提升近 2 dB、效率提高 10%,为片上高功率非线性光学应用提供了新的器件方案。

2.2 3–7 μm 波段量子级联 SOA

3–7 μm 是中红外关键大气窗口,在气体传感、红外对抗等领域具备不可替代的应用价值,该波段已超出传统 InGaAs/InP 量子阱的有效响应区间,因此 QCL-SOA 成为主流技术方案。QCL-SOA 基于导带子带间跃迁实现光放大,可稳定覆盖 3–7 μm 波段窗口,是该波段实现集成化、高功率光放大的核心器件。

QCL-SOA 的研究始于 21 世纪初,早期工作聚焦于器件放大可行性的验证。2002 年, Troccoli^[18] 等人首次报道 7.4 μm 波段中红外 QCL-SOA,采用主振荡功率放大(MOPA)结构与 7° 斜腔设计有效抑制光学反馈,无需增透膜即可实现边模抑制比超 30 dB 的单模工作;脉冲工作模式下 80 K 时峰值增益达 6.4 dB、输出功率为 0.5 W,300 K 时增益降至 4.9 dB、输出功率降至 0.25 W,同时通过波导结构优化将侧向远场发散角压缩至 12°,在国际上首次验证了量子级联结构在中红外波段的光放大能力,奠定了该类器件的技术基础。2015 年, Slivken^[19] 等人将非对称采样光栅 DFB 激光器与 QCL-SOA 单片集成,制备了 4.8 μm 波段中红外集成放大器,通过优化 14 μm 脊宽几何结构与端面增透膜(反射率小于 1%)设计,实现了脉冲工作峰值功率 5 W、连续波(CW)功率 1.25 W,单模调谐范围达 300 nm 且输出光束保持近衍射极限(M^2 约等于 1.1),其连续波输出特性如图 2(c)所示,为可调谐中红外光源提供了标准化集成方案。

在集成方案方面,QCL-SOA 主要沿硅基异质集成、单片阵列集成与系统适配三条路线发展。2018 年, Zhou^[6] 等人将 DFB 种子光源、树状 MMI(多模干涉)功率分束器与 16 通道 QCL-SOA 阵列单片集成,采用 4° 斜端面与 Y_2O_3 增透膜设计将放大器端面反射率抑制至 0.1% 以下,在 4.8 μm 波段实现峰值功率 30 W、光谱宽度小于 11 nm、边模抑制比超 25 dB 的单模放大输出,16 通道 QCL-SOA 阵列与 DFB 种子光源单片集成后的复合显微镜图像如图 2(a)所示,其中包含树状 MMI 功率分束器的集成器件结构清晰可见,直观呈现了该

阵列化器件的基础形貌。此外,该 16 通道单模锁相量子级联放大器阵列在脉冲模式下的功率-电流-电压曲线如图 2(b)所示,直观反映了该 16 通道器件在不同工作电流条件下的输出特性,充分印证了多通道光束合成方案在突破单器件功率瓶颈方面的规模化应用潜力。面向系统适配与规模化制备,2022 年, Midkiff^[21] 等人基于 InGaAs/InP 平台开发中红外 16 通道非周期光相控阵,并配套研制适配 3–5 μm 中红外窗口的 InP 基 QCL-SOA,通过低折射率对比度波导与热隔离设计,显著提升放大器在工作波段内的增益稳定性,满足中红外光束扫描系统的功率输出需求。2023 年, Fei^[22] 等人采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术生长了 3 W 连续波室温 QCL,通过优化外延结构实现了 4.6 μm 波长的高功率输出,斜率效率达 2.47 W/A,验证了 MOCVD 技术在 QCL 大规模制备中的可行性,为中红外 QCL-SOA 的批量化、低成本制备提供了重要工艺参考。

近期研究聚焦于器件结构与散热优化,持续提升量子级联 SOA 的工程实用化水平。2024 年, Wang^[23] 等人采用双通道脊波导结构优化 5 μm 中红外 QCL,通过调控 15 μm 脊宽降低模式损耗,搭配高热导率热沉改善器件散热,最终实现连续波输出功率 2.2 W、斜率效率 2.47 W/A,同时保持发散角小于 15° 的良好光束质量,进一步推动 InP 基 QCL-SOA 走向实际工程应用。2022 年, Dhingra^[58] 等人针对长波红外波段开发了 InP 基 QCL,采用 MOCVD 在 GaAs 衬底上生长 8.5 μm 发射波长的应变补偿结构,通过引入 InAs 量子点状位错过滤层获得低位错密度,实现了室温脉冲工作下 1.95 W/facet 的峰值输出功率与 1.86 kA/cm² 的低阈值电流密度,有效拓展了 QCL 在长波红外波段的实用化工作能力。

总体来看,3–7 μm 波段 QCL-SOA 历经原理验证、单片集成、硅基异质兼容、阵列化功率拓展与效率性能迭代,已形成从单器件到集成系统、从实验室原型到工程化器件的完整技术体系。同时,其凭借波段覆盖、高增益、高功率与良好光束质量的综合优势,成为了 3–7 μm 中红外气体传感、红外对抗、光束合成等应用场景的核心放大器件,并持续推动着中红外光子系统向集成化、高功率、实用化方向快速发展。

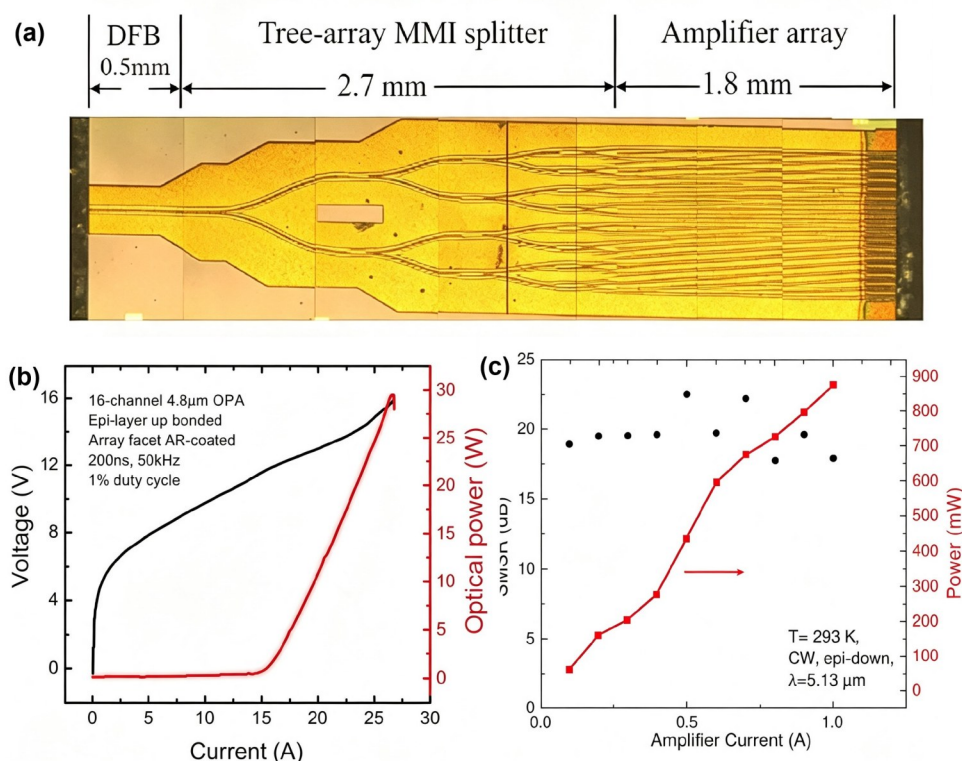


图2 (a)16通道量子级联放大器阵列与DFB种子段单片集成的复合显微镜图像^[6]; (b)脉冲模式下16通道单模锁相量子级联放大器阵列的功率-电流-电压特性曲线^[6]; (c)单片集成QCL-SOA在CW模式下输出功率和边模抑制比随放大器电流的变化关系^[19]。

Fig.2 (a) composite micrograph of the 16-channel quantum cascade amplifier array integrated with the DFB seed section; (b) CW output power and SMSR vs. amplifier current of the monolithically integrated QCL-SOA; (c) power-current-voltage characteristics of the single-mode phase-locked quantum cascade amplifier array in pulsed mode.

2.3 8–12 μm 长波中红外放大技术

8–12 μm 长波中红外对应第二大气窗口, 覆盖众多有毒有害气体的特征吸收谱线, 在红外制导对抗、化学遥感等领域需求迫切。8–12 μm 波段的集成式 SOA 研究进展相对缓慢, 以脉冲工作的 MOPA 结构为主要技术路线。2012 年, Rauter^[67] 等人首次演示了 9.2–9.8 μm 波段的集成式 MO-PA-QCL 阵列, 每个单元由 DFB 种子激光器和锥形功率放大器组成, 利用绝热模式扩展原理在保持单模特性的同时实现功率放大, 室温脉冲峰值功率达 0.8–3.9 W, 远场发散角约 6°, 为长波中红外高功率单模光源提供了集成化解决方案。2013 年, Rauter^[68] 等人进一步优化 MO-PA-QCL 阵列设计, 通过简化 DFB 光栅结构 (去除 $\lambda/4$ 相移、采用均匀光栅) 显著提升了种子段至放大器的耦合效率, 将阵列峰值功率提升至 2.7–10 W, 系统比较了两种种子段设计的性能差异, 验证了简化光栅设计在单模高功率输出方面的优越性, 同时保持近衍射极限光束质量, 使该结构成为 8–12 μm 波

段集成式 SOA 的代表性工作。

总体来看, 8–12 μm 波段的集成式 SOA 以 MO-PA 结构为主要技术路线, Rauter 等人完成的 MO-PA-QCL 阵列工作率先验证了量子级联激光器 MOPA 架构在 8–12 μm 波段的可行性, 未来突破方向在于借助片上异质集成或利用低有效质量材料体系, 将光放大与光束合成纳入统一架构, 以期在室温连续工作条件下实现高功率、窄线宽与宽调谐的协同优化, 推动该技术从实验室走向实用化。

InP 基半导体光放大器具备工艺集成度高、室温下可实现较高输出功率的突出优势, 但受限于材料带隙, 传统带间量子阱增益结构的工作波长很难超过 2.5 μm。若要拓展至 3 μm 以上波段, 则需要采用基于子带间跃迁机制的 QCL-SOA。QCL-SOA 的上能级寿命仅为皮秒量级, 虽然增益恢复速度快, 但有源区储能能力弱、难以积累足够的脉冲能量, 因此在短脉冲放大场景下的应用受到制约, 这也是 InP 基器件和 II-VI 族长寿命掺杂增益介质之间一项本质的物理区别。

表 1 InP 基中红外半导体光放大器研究进展

Table 1 Research Progress of InP-based Mid-Infrared Semiconductor Optical Amplifiers

年份	波长/ μm	带宽/nm	功率/W	测试条件	文献
2002	7.4	—	0.5	-193.15 °C, 脉冲	[18]
			0.25	26.85 °C, 脉冲	
2012	9.15-9.77	620	0.8-3.9	室温, 脉冲	[67]
2013	2.07	27	—	19 °C, CW	[14]
2013	9.2-9.75	550	2.7-6.8	室温, 脉冲	[68]
2015	4.8	—	5(脉冲)	25 °C, 脉冲	[19]
			1.25(CW)	20 °C, CW	
2018	4.8	4-11	30	15 °C, 脉冲	[6]

3 硅基中红外半导体光放大器

除上述基于载流子注入的半导体增益介质外,依托硅基平台三阶非线性效应(受激拉曼散射与四波混频)的中红外光放大器,是硅基中红外光子学的重要发展方向。硅材料在 1.1-8 μm 波段透明,且在波长大于约 2.2 μm 后双光子吸收及其诱导的自由载流子吸收可忽略,为中红外波段高效率非线性放大提供了物理基础;同时硅具有极高的拉曼增益系数与光学损伤阈值,并完全兼容 CMOS 工艺,在低成本、批量化的片上中红外放大方面具有独特吸引力。

首先是硅基异质集成 InP 基半导体光放大器,该类器件主要通过晶圆键合工艺将 III-V 族有源材料异质集成至 SOI 硅平台,依靠载流子注入实现光放大。2016 年,Volet^[15]等人研制出首个异质集成在硅上的 2.0 μm SOA,其顶视微观图如图 3(a)所示,呈现了有源区与 SOI 硅波导通过晶圆键合实现集成的器件形貌,为理解该异质集成结构的物理布局提供了直观的形貌参考。团队利用晶圆键合实现有源区与 SOI 硅波导的集成,结合质子注入构建电流通道、端面镀增透膜抑制寄生反射,在 20 °C、330 mA 注入电流下实现片上增益超 10 dB,40 nm 带宽内增益平坦,且在 -40 dBm 至 -9 dBm 的输入功率范围内无增益饱和,团队测得的 SOA 输出光谱如图 3(b)所示。为进一步提升集成式 SOA 的放大性能,器件结构与工艺的优化成为核心改进路径。2016 年,Davenport^[55]等人通过异质集成技术在硅上制备了 InP 基高功率 SOA,重点考察了硅波导宽度对有源区限制因子与器件热特性的影响规律,其中 1.4 μm 波导宽度器件实现了 16 dBm 的最大输出功率,为实用化片上中红外系统提供了可靠的热管理与功率输出方案。2017 年,Volet^[16]等人对 2.0 μm 硅基异质集成 SOA 进行迭代优化,其噪声系数为 17.2 dB,基于

InP/InGaAs 量子阱有源区与部分刻蚀硅脊波导耦合结构,精细调控波导宽度与电流通道尺寸,在 20 °C 下测量的功率-电流特性和电压-电流特性如图 3(c)所示,反映了器件经波导宽度与电流通道尺寸精细调控后,在 20 °C 下将峰值片上增益提升至 13 dB、3 dB 带宽拓宽至 75 nm 并具备 50 °C 内稳定工作能力的电学传输行为与增益稳定性,完成了硅基异质集成 SOA 从可行性验证到增益性能提升的关键迭代。

2017 年,Spott^[20]等人系统综述了中红外硅基光子异质集成技术,报道了将 QCL 增益结构用于硅基异质集成平台、研制 4.8 μm 波段中红外 QCL-SOA 的技术路线,依托 SONOI(Silicon on Nitride on Insulator,氮化物上硅)波导平台与窄台面结构设计。2019 年,Van Gasse^[54]等人通过晶圆键合技术在硅上制备了 InP 基高增益 SOA,在 2 μm 波段实现了 27 dB 的片上净增益与超过 17 dBm 的饱和输出功率以及 8-9dB 的噪声系数,其波导宽度优化结果表明,减小波导宽度可提高限制因子从而获得高增益,增大波导宽度则有利于提升饱和功率与散热能力,二者存在折中关系,为片上高功率非线性光学应用提供了高性能器件方案。2020 年,Op de Beeck^[57]等人采用微转移印刷技术将 III-V 半导体 SOA 与 Si_3N_4 波导平台异质集成,通过引入氢化非晶硅中间层克服折射率失配,实现了高达 14 dB 的片上净增益与 8 mW 的饱和功率,验证了 III-V 增益介质与低损耗 Si_3N_4 平台的高效耦合,为中红外光谱系统提供了关键的片上放大技术路径。

其次为硅基三阶非线性放大器,该类器件无需引入 III-V 族有源芯片,直接利用硅自身三阶非线性效应,依靠外部泵浦光实现信号放大,包含受激拉曼放大与四波混频参量放大两种工作机制。2007 年,Raghunathan^[69]等人首次实验演示了中红

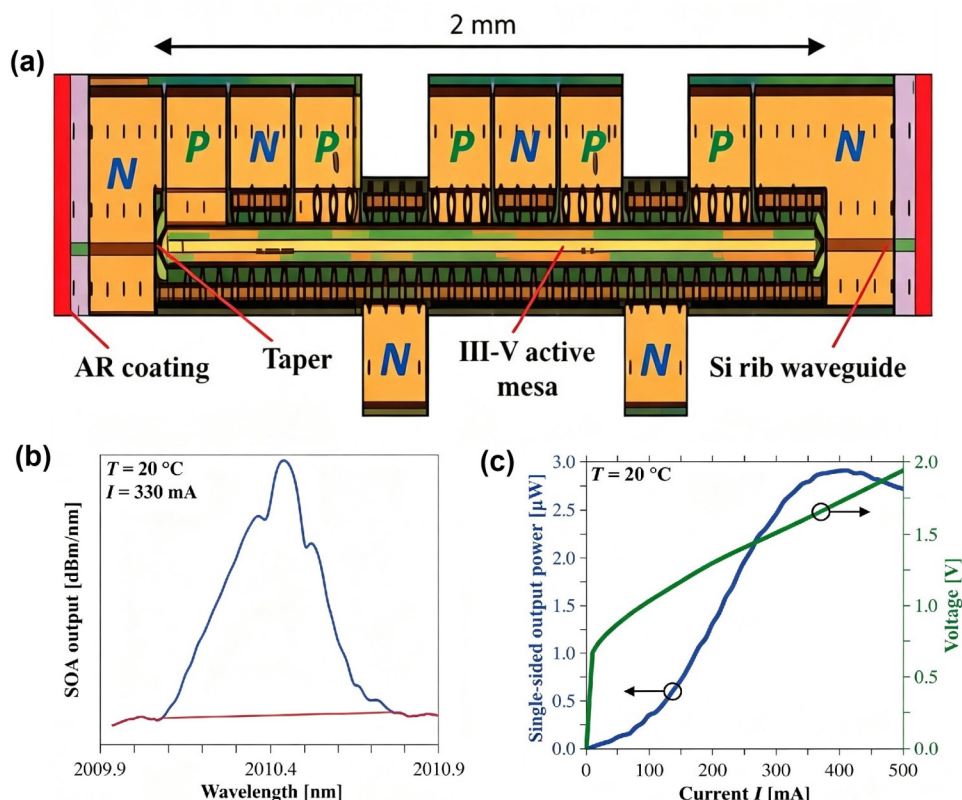


图3 (a)首个异质集成在硅上的2.0 μm SOA 顶视微视图^[15]; (b) 20 $^{\circ}\text{C}$ 、330 mA 注入电流、2.01 μm 泵浦波长条件下测得的 SOA 输出光谱, 红色曲线为参与噪声系数计算的 ASE 电平^[15]; (c) 2.0 μm 硅基异质集成 SOA 迭代优化后在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下测量的功率-电流特性(蓝线)和电压-电流特性(绿线)^[16]。

Fig.3 (a) Top-view micrograph of the first SOA heterogeneously integrated on silicon at 2.0 μm ^[15]; (b) SOA output spectrum measured with a 2.01 μm pump at 20 $^{\circ}\text{C}$ and 330 mA, the red curve indicates the ASE level involved in the computation of the noise figure ^[15]; (c) Power-current (blue) and voltage-current (green) characteristics of 2.0 μm silicon heterogeneously integrated SOA measured at 20 $^{\circ}\text{C}$ after iterative optimization ^[16].

外硅拉曼放大器, 采用 2.88 μm 、5 ns 脉冲泵浦 2.5 cm 长的体硅样品, 对 3.39 μm 信号光实现了 12 dB 的拉曼增益, 验证了硅基拉曼放大向中红外波段延伸的可行性。在片上参量放大方面, 2010 年, Liu^[70]等人利用截面 700 nm $\times$ 425 nm 的硅纳米光子波导, 以 2.17 μm 皮秒脉冲泵浦 4 mm 长波导, 基于四波混频在 2 μm 波段实现了片上参量放大, 信号光与闲频光的片上增益分别达 24 dB 与 25.4 dB, 增益带宽覆盖 2060-2280 nm, 扣除耦合与传输损耗后的净片外增益达 13 dB, 展示了硅基波导在中红外宽带参量放大方面的巨大潜力。

最后是新一代混合与三维集成硅基放大器。2024 年以来, 中红外硅基半导体放大与增益集成研究分化为增益芯片混合集成与 SOA 三维集成两条技术线索。在增益芯片混合集成方向, 2024 年 Ojanen^[75]等人将 GaSb 基 RSOA 与 Si_3N_4 无源电路混合集成, 在 2.6 μm 波段实现线宽优于

50 kHz 的窄线宽输出, 确立了“GaSb 增益芯片+硅基无源电路”的技术范式; 2024 年, Dal Cin^[76]等人在 GaSb 带间级联平台上将 ICL 增益段反向用作行波 SOA, 得到 19.3 dB 片上增益并完成单片外差接收, 为级联型有源区的放大功能复用提供重要参考。2025 年 Wei^[77]等人利用单个超紧凑硅微环替代分布式反馈结构, 进一步压缩器件尺寸同时拓展调谐能力。在 SOA 三维集成方向, 2025 年 Arafat^[71]等人采用微转移打印工艺将 SOA 直接集成至 SOI 平台, 首次实现 2 μm 波段硅基电泵浦片上半导体放大, 使半导体放大器本体真正集成于硅基平台; 2026 年 Wei^[78]团队采用四片不同波段的 RSOA 增益芯片, 将混合集成器件的工作波长拓展至完整 2~3 μm 波段, 完成从单点功能器件向全波段系统级光源的跨越。

综上, 目前硅基中红外光放大器已形成非线性纯硅放大、InP 基异质集成 SOA 与新型混合/三

维集成放大多元并行的技术体系。其中纯硅非线性放大结构简单、带宽优异,但受泵浦条件限制,实用性能有限;异质集成 SOA 可实现电泵浦高增益放大,是当前主流技术方案;新兴的混合与三维集成工艺则进一步推动器件小型化、高性能与系

统集成化发展。依托良好的 CMOS 工艺兼容性,硅基中红外放大技术具备规模化量产与落地应用的潜力。未来通过集成工艺优化、热管理改进与微纳结构创新,可进一步平衡各项性能指标,推进硅基器件实用化进程。

表 2 硅基中红外光放大器研究进展

Table 2 Research Progress of Silicon-Based Mid-Infrared Optical Amplifiers

年份	波长/ μm	增益/dB	带宽/nm	功率/W	测试条件	文献
2007	2.88	3.5-12	—	—	室温,CW	[69]
2010	2.17	24	>220	0.098	室温,CW	[70]
2016	2	12	40	0.000032	20℃,CW	[15]
2017	2	13	75	0.0204	20℃,CW	[16]
2019	2	27	20	0.0562	20℃,CW	[54]
2024	2.6	—	170	0.0064	室温,CW	[75]
2024	3.7-4.2	19.3	—	—	室温,CW	[76]
2025	2	12	26	0.011	室温,CW	[71]
2025	2.37	—	22	0.008	室温,CW	[77]
2026	2.91	—	950	0.028	室温,CW	[78]

4 GaSb基半导体光放大器

GaSb 基半导体材料的能带结构可通过量子阱组分与结构设计灵活调控,其增益波段可天然覆盖 2-4 μm 的短波中红外范围^[24-26]。GaSb 基材料体系可制备出具备高增益系数、高输出功率、低阈值电流密度的增益结构,在室温下可实现连续波模式的稳定光放大^[27-28]。可通过 MBE 技术在 GaSb 衬底上生长高质量的外延层结构,精准构建包含 InGaAsSb 量子阱有源区、AlGaAsSb 势垒层与波导限制层的完整异质结结构,实现优异的光场限制与载流子限制能力^[29-32]。同时可基于该材料制备脊型波导、斜角端面、增透/高反膜系的反射式半导体光放大器(RSOA)结构,有效抑制寄生激射,适配外腔激光器的混合集成应用需求^[33]。

在 GaSb 基 SOA 的实用化推进过程中,研究人员围绕有源区结构设计、反射式抗反馈构型、硅基异质集成工艺以及混合集成可调谐光源展开系统性创新,持续突破器件性能与集成瓶颈。2018 年,Arafin^[34]等人基于 GaSb 基 InGaAsSb/AlGaAsSb 量子阱异质结构,采用偏移量子阱(Offset Quantum Well, OQW)有源与无源集成工艺制备中红外 SOA,实现了 2.2-2.8 μm 波段光功率放大,将单片集成放大输出功率提升至 10 mW,为短波中红外核心探测窗口提供了高功率放大方案。同年,Wang^[35]等人采用 InP 基 II 型 InGaAs/GaAsSb 量子阱有源结构,通过 DVS-BCB 粘接键合将 SOA 异质集成于 SOI 硅光子平台,搭配锥形模场转换器优

化耦合效率,在 5℃、150 mA 注入电流的连续波模式下,于 2.34 μm 处获得了 9.5 dB 的片上峰值增益,为 2.3 μm 宽调谐激光器提供了宽带增益单元。

在反射式 SOA 设计与性能优化方面,研究人员围绕有源区工程和异质集成方案展开了深入探索。2020 年,Ojanen^[36]等人研制 GaSb 基反射式中红外 SOA,采用双压缩应变 GaInAsSb 量子阱有源区与梯度掺杂包层,结合 J 型欧拉螺旋脊波导与 7° 斜端面镀膜设计,在 20℃ 脉冲条件下实现 84 nm 增益谱宽,平均输出功率达 6.8 mW。2022 年,Zia^[37]等人采用倒装芯片将 GaSb 基反射式 SOA 与 3 μm 厚 SOI 波导耦合,通过 J 型脊波导与斜端面结构抑制反馈,将量子阱限制因子优化至 2.4%,实现 2 μm 波段模式匹配损耗低至 0.6 dB,室温 CW 输出功率 6.12 mW,边模抑制比最高达 37 dB。采用倒装芯片技术将 GaSb 基反射式 SOA 与 3 μm 厚 SOI 波导耦合后,基于 RSOA 与 SOI 波导之间端射耦合的混合集成 DBR 激光器三维模型如图 4(a)所示,直观呈现了该混合集成方案的器件架构与耦合方式。2023 年,Bhuiyan^[38]等人基于 GaSb 基底设计非对称多量子阱 SOA,通过组合不同厚度 GaInSb/AlGaAsSb 量子阱调控跃迁能级,在 2 μm 波段实现超 340 nm 增益带宽与 1253 cm^{-1} 峰值增益,大幅拓宽平坦增益区间。同年,Zia^[39]等人采用 MBE 制备 GaSb 基反射式 SOA,以 $\text{In}_{0.25}\text{GaSb}$ 双量子阱为有源区,结合斜端面镀膜与

反向锥形耦合结构,该研究在室温下实现了 $2\ \mu\text{m}$ 波段 $15\ \text{mW}$ 连续波输出, $90\ \text{nm}$ 调谐范围下边模抑制比超 $20\ \text{dB}$, 阈值电流低于 $100\ \text{mA}$ 。基于 GaSb 反射式 SOA 与 Si_3N_4 光子集成反射镜混合集成的广泛可调谐激光器设计详细示意图(上)及混合激光器三维示意图(下)如图 4(b)所示,清晰呈现了该方案的器件布局与光学路径设计。

硅基异质集成工艺的突破推动 $2\text{--}3\ \mu\text{m}$ SOA 向片上集成系统演进。2025 年, Tuorila^[40] 等人首次采用微转移印刷实现 GaSb 基反射式 SOA 与 SOI 硅光子平台异质集成, 通过牺牲层刻蚀完成器件剥离, 配合抗寄生激射设计, 转移后阈值电流低至 $21\ \text{mA}$, 与硅基 DBR 反射镜耦合实现 $2\ \mu\text{m}$ 单模激射, 采用微转移印刷技术实现的 GaSb 基光电子芯片与硅光子集成电路异质集成后的 GaSb/ Si_3N_4 混合微波光波导(MWL)示意图如图 4(c)所示, 直观反映了微转移印刷工艺在实现低阈值($21\ \text{mA}$)中红外片上集成方面的关键波导耦合结构与集成架构。同期, Ojanen^[41] 等人将 GaSb 基反射式 SOA 与 Si_3N_4 光子集成芯片混合集成, 构建 $2.6\ \mu\text{m}$ 离散可调谐激光器, 在 $540\ \text{mA}$ 电流下实现 $0.75\ \text{mW}$ 放大自发辐射功率, 支持三路波长可切换单模输出。同时, 面向宽调谐高纯度中红外光源需求, SOA 与硅基滤波结构混合集成成为主流方向。2025 年, Wei^[33] 等人研制 GaSb 基反射式中红外 SOA, 采用 $\text{In}_{0.44}\text{GaAs}_{0.18}\text{Sb}$ 双量子阱有源区, 与硅基级联微环谐振器 Vernier 滤波器混合集成, 系统呈现了该器件在 $2.3\text{--}2.4\ \mu\text{m}$ 波段实现 $125\ \text{nm}$ 超宽准连续调谐、边模抑制比超 $60\ \text{dB}$ 、室温片上输出功率 $11\ \text{mW}$ 的混合集成结构设计与光路布局, 阈值电流密度仅 $1.6\ \text{kA}/\text{cm}^2$, GaSb-Si 混合超宽带可调谐激光器示意图如图 4(d)所示, 为高集成度中红外可调谐光源提供了标杆方案。2015 年, Holl^[24] 等人综述了 GaSb 基半导体盘激光器的功率缩放研究进展, 系统总结了外延结构优化、横向激射抑制、多增益单元及高效热管理等关键技术, 实现了 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段 $17\ \text{W}$ 的连续波输出功率, 验证了 GaSb 基材料体系在短波中红外波段的高增益潜力与功率缩放能力, 为 GaSb 基 SOA 向更高功率方向发展提供了关键参考。2025 年, Arafat^[71] 等人进一步报道了面向 $2\ \mu\text{m}$ 波段的微转移印刷 SOA-on-SOI 器件, 将 GaSb 基 SOA 增益芯片通过微转移印刷工艺集成至 SOI 平台并验证了

片上放大功能, 表明微转移印刷集成路线正从混合集成激光器向片上放大器件拓展, 该技术可适用的集成器件类型愈发多样。

在进一步提升器件性能方面, 研究者们还探索了有源区能带工程的优化策略。2008 年, Lehnhardt^[59] 等人通过 MBE 技术制备了 GaInAsSb/GaSb 应变量子阱激光器, 系统研究了压应变对载流子限制及 Auger 复合的影响, 在 $3\ \mu\text{m}$ 以上波段实现了 CW 单模工作, 显著改善了器件在高温工作条件下的增益稳定性, 为 GaSb 基中红外 SOA 的有源区设计提供了早期实验依据。2009 年, Kashani-Shirazi^[60] 等人通过优化 GaInAsSb/GaSb 应变量子阱的组分与结构设计, 实现了 $2.5\text{--}2.7\ \mu\text{m}$ 波段的低阈值激光发射, 阈值电流密度低至约 $1\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 验证了压应变对 Auger 复合的有效抑制与载流子限制的改善, 为 GaSb 基中红外 SOA 的有源区能带工程优化提供了重要实验依据。2025 年, Yang^[32] 等人从历史和发展的角度系统综述了带间级联激光器的研究进展, 讨论了 GaSb 基材料体系在 $2\text{--}4\ \mu\text{m}$ 波段的设计原理与物理机制, 总结了外延结构优化、热管理及能带工程方面的关键经验, 为 GaSb 基 SOA 的材料体系选择与器件结构优化提供了重要理论参考。

目前 $2\text{--}3\ \mu\text{m}$ 波段的 GaSb 基 II 型量子阱半导体光放大器, 已经能够实现较宽的光谱覆盖, 同时获得高增益与较高输出功率, 硅基异质集成方面的关键技术也已经得到验证。但该类器件依旧存在不少现实瓶颈: 高温工作条件下增益会出现明显衰减, 异质集成带来的耦合损耗偏大, 外延生长与器件加工的批量制备一致性也有待改善。回顾该方向的研究脉络, GaSb 基 SOA 的研究重心正在发生转变, 逐步从单纯的增益芯片原理验证, 转向混合集成光源的实际搭建。早期研究主要围绕有源区展开, 目标是不断提升材料增益与光谱带宽, 其中非对称量子阱结构的材料增益可达 $1253\ \text{cm}^{-1}$ ^[38]。近几年的研究更多采用反射式构型来抑制寄生反馈, 结合倒装芯片、微转移印刷等集成工艺, 把 GaSb 增益芯片和硅基无源器件组合, 搭建出外腔可调谐激光器以及片上光谱探测系统, 已经实现 $125\ \text{nm}$ 调谐范围, 边模抑制比优于 $60\ \text{dB}$ ^[33]。由此可以看出, 评判 GaSb-SOA 的综合性能, 不仅看增益这类器件本征参数, 还要关注它与硅光子平台配合实现系统功能的实际能力。因此后续研究需要

从热管理优化、波导模式匹配、标准化集成工艺迭代这几个方向入手,进一步改善器件工作稳定性,提升实用水平,推动该器件真正落地到便携式中红外传感、片上光谱系统等场景。

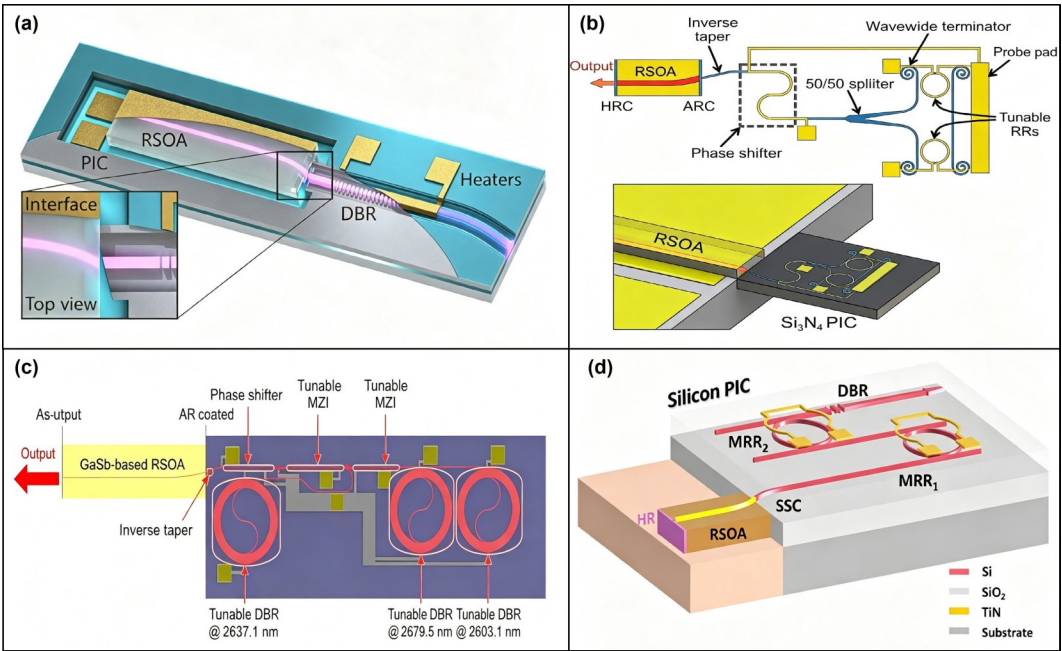


图 4 (a)基于倒装芯片集成和 RSOA 与 3 μm 厚 SOI 波导端射耦合的 2 μm 混合集成 DBR 激光器三维模型。器件室温 CW 输出 6.12 mW、边模抑制比 37 dB^[37]; (b)基于 GaSb 反射式 SOA 与 Si₃N₄ 集成反射镜的宽调谐混合激光器设计示意图 (上) 与三维示意图 (下)。室温输出功率为 15 mW、调谐范围为 90 nm^[39]; (c)微转移印刷 GaSb/Si₃N₄ 混合微波光波导示意图 (转移后阈值电流 21 mA)^[41]; (d)2.3-2.4 μm 波段超宽带可调谐 GaSb-Si 混合集成激光器示意图, 准连续调谐为 125 nm、边模抑制比 >60 dB^[33]。

Fig.4 (a) Three-dimensional model of a 2 μm hybrid-integrated DBR laser based on flip-chip integration and end-fire coupling between an RSOA and a 3 μm -thick SOI waveguide. The device delivers a CW output of 6.12 mW and a side-mode suppression ratio of 37 dB at room temperature.^[37]; (b) Design schematic (top) and 3D schematic (bottom) of a widely tunable hybrid laser based on a GaSb reflective SOA and Si₃N₄ integrated mirror. At room temperature, the output power is 15 mW with a tuning range of 90 nm.^[39]; (c) Schematic of GaSb/Si₃N₄ hybrid microwave-optical waveguides realized by micro-transfer printing (threshold current of 21 mA after transfer)^[41]; (d) Schematic of an ultra-broadband tunable GaSb-Si hybrid-integrated laser in the 2.3-2.4 μm band, with a quasi-continuous tuning range of 125 nm, side-mode suppression ratio > 60 dB^[33].

表 3 GaSb 基半导体光放大器研究进展

Table 3 Research Progress of GaSb-based Semiconductor Optical Amplifiers

年份	波长/ μm	带宽/nm	功率/W	测试条件	文献
2018	2.2-2.8	600	0.01	—, —	[34]
2018	2.34	120	0.0014	5 °C, CW	[35]
2020	2.6	84	0.0068	20 °C, 脉冲	[36]
2022	2	61-71	0.00612	23 °C, CW	[37]
2025	2-3	342	0.04	20 °C, 脉冲	[38]
2023	2	90	0.015	23 °C, CW	[39]
2025	2-3	100-150	0.055	室温, CW	[40]
2025	2.35	80	0.011	20 °C, CW	[33]

5 其他类型半导体光放大器

5.1 CdTe 基半导体光放大器

过渡金属掺杂 CdTe/CdSe 基 II-VI 族半导体作

为中红外增益介质,其放大机理与传统量子阱结构的带间跃迁存在本质差异。该类材料依靠过渡金属离子(如 Fe²⁺、Co²⁺)在晶格场中的内部 d-d 能级跃迁实现光放大,具有宽带可调谐、高发射截面及与基质晶格弱耦合等显著优势。具体而言, Fe²⁺ 离子在 CdSe 基质中的 ⁵E-⁵T₂ 跃迁可覆盖 4-6 μm 波段,室温荧光寿命约 20 ns; Co²⁺ 离子在 CdTe 基质中的 ⁴A₂ $\leftrightarrow$ ⁴T₂ 跃迁则可覆盖 3-5 μm 大气窗口,发射带宽达 725 nm^[42-43]。这种基于离子内部能级跃迁的增益机制不受半导体带隙限制,且增益带宽主要由晶格场强度和离子-声子耦合强度决定,因此可实现超宽带光放大。然而,该类增益介质也面临声子非辐射跃迁损耗严重、需低温工

作以抑制热淬灭、波导化集成工艺尚未突破等挑战,制约了其在紧凑型中红外系统中的应用^[44-45]。

3-6 μm 中红外大气窗口在分子光谱识别与超快激光应用方面具有重要价值,传统量子阱与量子级联型半导体光放大器在此波段易出现增益带宽不足、脉冲适配性差等问题,而过渡金属掺杂 CdTe/CdSe 基 II-VI 族半导体依靠离子内部能级跃迁,可实现宽带增益与匹配的荧光寿命,成为该波段高性能放大的重要方案^[44-45]。

针对 4.63-6.10 μm 飞秒脉冲宽带放大的特殊需求,Fe²⁺:CdSe 体系凭借适配的能级结构与发光特性展现出突出优势。2017 年, Frolov^[42] 等人采用籽晶物理气相传输法生长 Fe²⁺:CdSe 单晶,并结合硒蒸气后退火工艺优化材料缺陷与光学特性,依托 Fe²⁺ 在 CdSe 基质中 ⁵E-⁵T₂ 跃迁的宽带增益与室温 20 ns 荧光寿命,选用 2.94 μm 纳秒 Er:YAG 激光器完成泵浦,实现 27% 的吸收泵浦斜率效率,同时基于 Frantz - Nodvik 模型验证多通放大可输出 6 mJ 脉冲能量,直接证实该材料可作为 4-6 μm 飞秒脉冲宽带放大的核心增益介质。

面向 3-5 μm 中红外大气窗口的常规信号放大场景,Co: CdTe 体系则通过增益机制与损耗调控实现高效放大。2018 年, Turner^[43] 等人研制 3.7 μm 双通 Co: CdTe 中红外 SOA,考虑到室温下强声子非辐射跃迁会造成严重增益损耗,将增益介质冷却至 77 K 以抑制非辐射复合过程。双通掺钴碲化镉 (Co: CdTe) 中红外激光放大器装置示意图如图 5(a) 所示,呈现了增益介质冷却至 77 K 以抑制非辐射损耗的双通放大光路布局与 2.8 μm 连续波铒光纤激光器共振泵浦耦合结构,展示了该器件实现 2.8 倍峰值光学增益的实验装置架构。同时,利用 Co: CdTe 在 ⁴A₂ ↔ ⁴T₂ 跃迁的 725 nm 超宽发射带宽与 500 μs 长辐射寿命,采用 2.8 μm 连续波铒光纤激光器实现共振泵浦,最终在 77 K、2.8 μm 连续波共振泵浦条件下获得 2.8 倍的峰值光学增益 (对应约 4.5 dB 的双通小信号增益),成功放大 3.7 μm 带间级联激光器信号,该双通 Co: CdTe 中红外激光放大器的增益测试结果如图 5(b) 所示,充分验证了钴掺杂碲化镉半导体增益介质在中红外大气窗口波段的放大可行性。

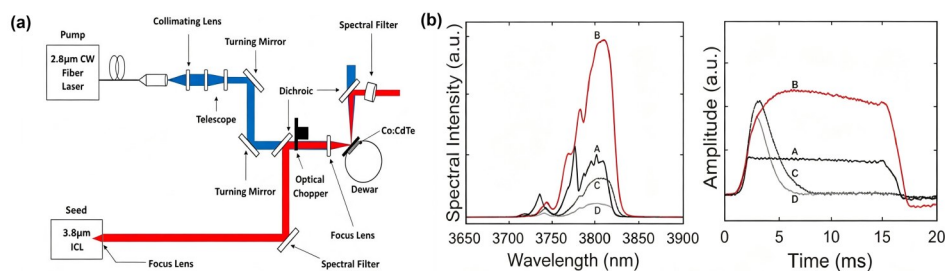


图 5 (a) 77 K 低温工作的双通 Co: CdTe 中红外激光放大器装置示意图,采用 2.8 μm 连续波铒光纤激光器共振泵浦;(b) 该放大器在 3.7 μm 波段的增益测试结果:峰值光学增益 2.8 倍、发射带宽 725 nm^[43]。

Fig.5 (a) Schematic of a double-pass Co: CdTe mid-infrared laser amplifier operating at 77 K, resonantly pumped by a 2.8 μm continuous-wave erbium-doped fiber laser; (b) Measured gain results of the amplifier in the 3.7 μm band: peak optical gain of 2.8-fold, emission bandwidth of 725 nm^[43]。

在改善热管理性能方面,2021 年, Martyshkin^[63] 等人开发了室温工作的 Fe: ZnSe 主振荡功率放大器系统,采用纳秒脉冲泵浦实现 3.8-5.0 μm 波段可调谐放大,在室温下获得了 60 mJ 的单脉冲能量输出,通过优化泵浦耦合与热沉设计有效抑制了热透镜效应,显著改善了光束质量,为高能量中红外光源的紧凑型化提供了可行方案。2019 年, Fedorov^[64] 等人开发了调 Q 和增益开关 Fe: ZnSe 激光器,采用被动调 Q 和增益开关技术,在 3.60-5.15 μm 范围内实现了可调谐激光输出,脉冲能量达毫焦量级,重复频率高达千赫兹级别,通过优化谐振腔设计和泵浦耦合效率,有效抑制了寄生

振荡,为 Fe: ZnSe 增益介质在脉冲放大和可调谐光源中的应用提供了关键实验参考。

尽管 CdTe 基过渡金属掺杂 SOA 在 3-6 μm 已实现宽带、高效的光放大,但其应用仍受明显制约。Fe²⁺: CdSe 与 Co: CdTe 器件多依赖块状单晶结构,波导化集成工艺尚未突破。同时, Co: CdTe 需低温工作才能抑制非辐射损耗,这是由于室温下 Co²⁺: CdTe 的 ⁴T₂ 激发态与晶格声子强耦合,多声子非辐射跃迁速率极高,实测荧光寿命被压缩至微秒量级,远低于其约 500 μs 的辐射寿命,荧光量子效率极低,不足以建立有效的粒子数反转与净增益;将增益介质冷却至 77 K 后,非辐射跃迁被

显著抑制,激发态寿命与增益系数提升约一个数量级,方才实现2.8倍的峰值光学增益^[43]。相比之下, $\text{Fe}^{2+}:\text{CdSe}$ 室温荧光寿命仅约20 ns^[42],非辐射损耗更为严重。因此,室温增益性能不足、需依赖低温制冷,是过渡金属掺杂CdTe/CdSe体系难以满足便携化、集成化中红外系统使用要求的核心物理限制。

5.2 ZnS/ZnSe基半导体光放大器

以 Cr^{2+} 、 Fe^{2+} 等过渡金属离子掺杂ZnSe、ZnS多晶作为增益介质的SOA,是中红外波段高功率飞秒脉冲放大的核心技术路径之一。其增益机理同样基于过渡金属离子的内部d-d能级跃迁: Cr^{2+} 离子在ZnSe/ZnS基质中的 $^5\text{E}-^5\text{T}_2$ 跃迁可覆盖1.8-3.0 μm 波段,具有约200 nm的宽带发射特性和约5 μs 的长辐射寿命; Fe^{2+} 离子在ZnSe中的跃迁则可拓展至3.5-5.5 μm 更长波段。与传统光学参量放大(OPA)方案相比,该类全固态放大器无需相位匹配,具有高发射截面、宽带可调谐及结构紧凑等优势。此外,多晶结构的高非线性系数有利于实现脉冲同步放大、光谱展宽与脉宽压缩的协同效应。然而,多晶增益介质的热导率普遍较低(ZnSe热导率约 $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),在高泵浦通量下热透镜效应与热致波前畸变显著;同时高增益多通结构极易诱发寄生振荡,对晶体侧面处理及腔镜隔离度要求严苛; Fe^{2+} 掺杂体系增益截面相对较小,往往需要低温环境或高亮度泵浦源以维持有效粒子数反转。这些物理瓶颈制约了该类器件向紧凑型、室温运行及高重复频率方向的工程化推广^[47]。

强场物理、精密光谱及高能物理等领域对中红外超快光源具有迫切需求,然而传统光学参量放大(OPA)方案依赖非线性晶体的相位匹配条件,结构复杂且增益带宽受限,难以兼顾高增益、超宽带与高光光转换效率。为此,以 Cr^{2+} 、 Fe^{2+} 等过渡金属离子掺杂ZnSe、ZnS、CdSe等II-VI族硫化物多晶作为增益介质的半导体光放大器,凭借其宽带可调谐、高发射截面及无需相位匹配的全固态优势,成为中红外波段高功率飞秒脉冲放大的核心技术路径^[46,48]。

2010-2011年,Mirov^[65-66]等人先后系统综述了 Cr^{2+} 与 Fe^{2+} 掺杂II-VI族硫化物中红外激光材料与激光器的研究进展,涵盖 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}$ 在1.8-3.0 μm 波段及 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 在3.5-5.5 μm 波段的发射特性、增益截面与温度猝灭行为,总结了后生长

热扩散掺杂、陶瓷制备及热管理等关键技术,并指出多晶结构的高非线性系数有利于实现脉冲同步放大与光谱展宽,为 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 纳米晶及胶体增益介质在硅基波导平台上的应用提供了材料基础与理论依据。

在早期高增益飞秒脉冲放大的探索方面,2016年,Potemkin^[44]等人研制了3.8-4.8 μm 波段中红外飞秒多通 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 半导体光放大器,采用2.85 μm 调Q Cr:Yb:Ho:YSGG固体激光器泵浦,结合三镜环形多通结构与氩气氛围抑制大气 CO_2 吸收干扰,通过调控增益介质温度将粒子数反转寿命从室温350 ns提升至7 $^{\circ}\text{C}$ 时的1.0 μs ,实现单通约6倍均匀宽带增益,六通总增益达2000倍,将40 nJ种子脉冲放大至80 μJ 输出能量,在200 fs脉冲宽度下峰值功率突破0.5 GW,为4-5 μm 波段高功率中红外飞秒脉冲提供了早期的高效放大方案。同期,Vasilyev^[45]等人研制了2.0-2.6 μm 波段多晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 与 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 中红外飞秒SOA,采用单程连续铒光纤泵浦结构,结合色散调控与克尔透镜锁模主振荡功率放大方案,利用增益介质高非线性特性实现脉冲同步放大、光谱展宽与脉宽压缩, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 与 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 放大器的输出特性随泵浦功率的演化规律如图6(a)所示,其中 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 放大器实现了7.1 W输出功率、33 fs脉冲宽度与574 nm(-10 dB)光谱宽度, $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 放大器实现2.8 W输出功率、27 fs脉冲宽度与635 nm(-10 dB)光谱宽度,光光转换效率达26%。

为进一步提升中红外SOA的输出功率、转换效率与光谱覆盖范围,2017年,Vasilyev^[46]等人研制了2.0-3.0 μm 波段多晶Cr:ZnS/Cr:ZnSe超快中红外SOA,采用后生长热扩散掺杂工艺制备增益介质,并结合色散补偿与铒光纤泵浦实现单程放大,在888 MHz重复频率下实现7.2 W输出功率、37%光光转换效率与8倍增益,Cr:ZnS/Cr:ZnSe超快放大器装置示意图如图6(b)所示。此外,Cr:ZnS放大器的脉冲自相关特性图6(c)所示,在1 kHz脉冲泵浦条件下获得了500倍的高增益与10 μJ 脉冲能量,同时产生覆盖1.8-4.5 μm 的倍频程超连续谱,实现了少光周期中红外脉冲的功率与能量高效缩放。在此基础上,2018年,Mirov^[47]等人研发了1.8-6.0 μm 波段过渡金属掺杂II-VI族硫化物半导体增益放大介质,采用 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}$ 与 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 多晶增益结构,通过后生长热扩

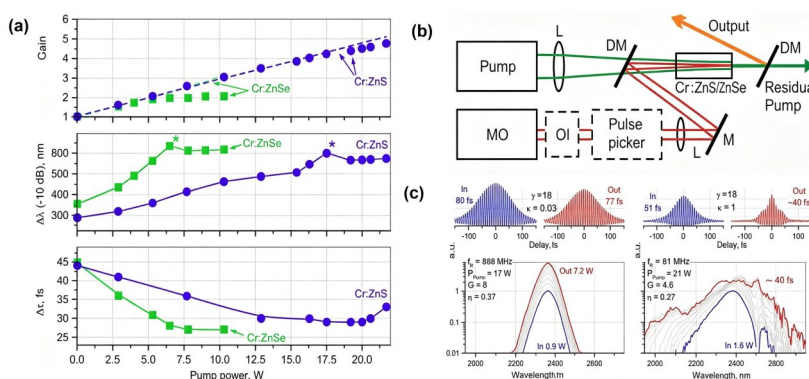


图6 (a) $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 与 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 飞秒放大器输出特性随泵功率的变化关系^[45]; (b) 单程 $\text{Cr}:\text{ZnS}/\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 超快放大器装置示意图, 系统的光-光转换效率为 37%^[46]; (c) 1 kHz 脉冲泵浦下 $\text{Cr}:\text{ZnS}$ 放大器的脉冲自相关特性, 其最高输出脉冲能量为 10 μJ ^[46]。

Fig.6 (a) Output characteristics of $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ and $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ femtosecond amplifiers as a function of pump power^[45]; (b) Schematic of a single-pass $\text{Cr}:\text{ZnS}/\text{Cr}:\text{ZnSe}$ ultrafast amplifier setup, the optical-to-optical conversion efficiency of the system is 37%^[46]; (c) Pulse autocorrelation characteristics of the $\text{Cr}:\text{ZnS}$ amplifier under 1 kHz pulsed pumping, its maximum output pulse energy is 10 μJ ^[46].

散掺杂工艺降低增益介质内部光损耗, 结合旋转型增益单元与金刚石/碳化硅高效热管理方案, 有效抑制热透镜效应, 实现中红外波段高增益、超宽带宽放大, 其中 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 增益介质在 2.4 μm 波段的激光振荡输出功率达 140 W, 增益带宽超 1 000 nm, 光光转换效率高于 60%。尽管如此, 百瓦级 CW 高功率运行时的热沉积管理、多晶介质内部散射损耗及光谱增益平坦度控制, 仍是制约该类放大器向更高平均功率与更短脉冲拓展的关键物理问题。

面向精密光谱操控与高能少周期脉冲等特殊应用需求, 2020 年, Andorf^[48] 等人研制了 2.0-3.0 μm (中心 2.2-2.45 μm) 波段单程 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 中红外半导体光放大器, 采用四能级增益模型建模, 以 1908 nm 的 CW 铥光纤激光器共振泵浦, 将增益介质冷却至 77 K 以抑制热透镜效应, 通过 1 mm 厚晶体设计适配光学随机冷却系统的光程延迟约束, 在 125 kW/cm^2 泵浦强度下实现约 7 dB 的单程增益, 结合波光学仿真完成波荡器宽带辐射的高效放大, 将电子能量偏移幅度从 17.4 meV 提升至 29.7 meV, 满足了光学随机冷却原理验证的实验需求。为进一步突破脉冲能量极限并拓展长波红外覆盖, 2023 年, Pushkin^[49] 等人针对 3.4-5.5 μm 中红外波段研发了铁掺杂硫系化物 SOA, 采用两级多通啁啾脉冲放大结构, 以 2.94 μm Er:YAG 激光器泵浦 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 增益介质并配合水冷散热与晶体侧面涂黑处理抑制寄生振荡, 将 4.4 μm 波段脉冲能量提升至 10.3 mJ; 同时在 3.7 μm 波段实现

$\text{Fe}:\text{ZnS}$ 晶体的宽带放大 (增益带宽 300 nm), 并通过 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 与 $\text{Fe}:\text{CdSe}$ 的光谱合成技术将增益带宽拓展至 500 nm, 有效支撑少周期中红外脉冲的高效放大。但需指出, 低温冷却方案增加了系统复杂性与运行成本, 而多级啁啾脉冲放大结构对色散补偿精度、脉冲对比度及光谱合成对准容差提出了极高要求, 工程化实现难度显著增大。

然而, 过渡金属掺杂 II-VI 族硫系化物 SOA 虽能通过能带工程与热管理实现中红外波段的高增益、超宽带及高平均功率输出, 但多晶增益介质的热导率普遍较低仍是核心瓶颈, 在高泵浦通量下热透镜效应与热致波前畸变显著加剧; 同时, 高增益多通结构极易诱发寄生振荡与自激辐射, 对晶体侧面处理及腔镜隔离度要求严苛; 此外, Fe^{2+} 掺杂体系增益截面相对较小, 往往需要低温环境或高亮度泵浦源以维持有效粒子数反转, 而光谱合成技术中不同增益介质间的对准精度与光谱拼接连续性亦难以保证, 这些因素共同制约了该类器件向紧凑型、室温运行及高重复频率方向的工程化推广。

5.3 InAs 基半导体光放大器

InAs 量子点及低维异质结结构作为中红外增益介质, 其核心优势源于三维载流子限域效应与可裁剪的能带排列。与传统体材料相比, 量子点结构通过将载流子限制在三维纳米尺度空间内, 可有效降低维格纳-赛兹原胞体积, 提升态密度与跃迁矩阵元, 从而显著增强有源区增益并抑制俄歇复合等非辐射损耗。在能带工程方面, II

型 InSb/InAs 量子点异质结通过空间分离电子与空穴波函数,可大幅延长载流子寿命并拓展发射波长至中红外波段;W 型 InGaAs/InAs/GaAsSb 纳米异质结则通过优化电子与空穴概率密度分布、调控偶极矩矩阵元,可在 TE 偏振模式下实现高达 4500 cm^{-1} 的峰值光学增益。此外,量子点结构的非均匀展宽效应可自然形成宽带增益谱,有利于实现超宽带光放大。然而,InAs 量子点 SOA 也面临严峻挑战:深低温工作需求(通常小于 120 K)限制了其实用化进程;波导损耗显著高于材料增益,净增益窗口狭窄;面向更长波长(大于 $5\text{ }\mu\text{m}$)应用时,材料体系与泵浦方案仍需进一步拓展。

中红外 SOA 在 $3\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$ 波段面临严峻的材料物理瓶颈:传统体材料因俄歇复合与非辐射跃迁占主导而增益效率低下,且能带工程难以在长波长响应与载流子有效限制之间取得平衡,导致器件阈值高、工作温度受限。为此,量子点及低维异质结结构凭借其三维载流子限域效应与可裁剪的能带排列,成为突破中红外增益瓶颈的关键技术途径。

在量子点中红外增益原理的早期实验验证方面,2014 年, Lu^[50]等人研制了 $3.02\text{--}3.11\text{ }\mu\text{m}$ 波段的 II 型 InSb/InAs 量子点半导体光放大增益器件,采用液相外延与 MBE 混合制备结构,以 $\text{p-InAs}_{0.61}\text{Sb}_{0.13}\text{P}_{0.26}$ 为下包层、 n^+InAs 等离子体层为上包层,在 4 K 条件下首次实验测得单量子点层 2.9 cm^{-1} 的材料增益与 15 cm^{-1} 的波导损耗,通过提升量子点密度与优化载流子限制保障了中红外增益输出,最高脉冲工作温度达 120 K,为中红外量子点型 SOA 提供了核心增益特性与结构设计的早期参考。然而,该器件需在深低温下工作,且波导损耗显著高于材料增益,净增益窗口狭窄,难以满足实用化需求。

在此基础上,研究者转向通过能带结构优化与低维异质结设计来提升中红外增益系数并改善载流子限制效率。2017 年, Yadav^[51]等人采用六带 $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 理论设计了 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 中红外波段的 W 型 II 型 InGaAs/InAs/GaAsSb 纳米异质结半导体光放大增益结构,通过优化电子与空穴概率密度分布、调控偶极矩矩阵元和动量矩阵元,在 TE 偏振模式下实现了高达 4500 cm^{-1} 的峰值光学增益, TM 偏振模式下增益亦达 470 cm^{-1} ,有效提升了中红外波段光放大增益性能,为分子传感、光谱检测等中红外应用提供了高增益有源介质理论方案。尽管如此,上述

研究多集中于 $3\text{--}3.5\text{ }\mu\text{m}$ 短中红外波段,且以理论设计为主,面向更长波长(大于 $5\text{ }\mu\text{m}$)及超宽带应用时,材料体系与泵浦方案仍需进一步拓展。

为进一步将量子点 SOA 推向更长波长并实现宽带放大能力,2024 年, Eyvazi^[52]等人通过采用 $\text{InAs}_{0.4}\text{Sb}_{0.6}$ 量子点嵌入 InP 量子阱的有源结构,结合光泵浦技术实现了有源区的粒子数反转,获得了 8.92 dB 的信号增益与 17 THz 的超宽带宽,显著提升了中红外量子点 SOA 的放大效率与宽带性能。量子点 SOA 新型结构如图 7(a)所示,该结构通过光泵浦实现有源区粒子数反转,并利用时域有限差分法优化量子点三维限域效应,为在 $6\text{ }\mu\text{m}$ 中红外波段实现光学信号放大提供了创新的器件架构方案。上述量子点 SOA 在输入光功率 $P_{\text{in}}=10\text{ mW}$ 条件下的输入信号与放大后输出信号对比如图 7(b)所示,直观反映了该器件在 $6\text{ }\mu\text{m}$ 波段实现 8.92 dB 信号增益与 17 THz 超宽带宽的理论预期,证实了量子点结构配合均匀/非均匀展宽调控在中红外宽带放大中的显著优势。在量子点材料的室温化探索方面,2026 年, Wang^[72]等人 InP 衬底上成功制备了五层堆叠的 InAs/ $\text{In}_{0.532}\text{Ga}_{0.468}\text{As}$ 量子点有源区,量子点面密度达 $1.83\times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ 、室温光致荧光谱半高宽仅 42.4 meV,实现了 $2.018\text{ }\mu\text{m}$ 波长的室温脉冲激励,阈值电流密度低至 589 A/cm^2 (折合单层仅 118 A/cm^2 ,为目前室温 InP 基中红外激光器的最低报道值),最高工作温度达 $50\text{ }^\circ\text{C}$,首次证实了 InAs/InP 量子点作为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以上中红外室温增益介质的可行性,为电注入量子点中红外 SOA 的室温化提供了关键材料基础。2023 年, Guo^[61]等人采用分子束外延技术在硅衬底上生长了 InGaAs/GaAs 亚单层量子点量子级联探测器,通过优化量子点生长温度与 InGaAs 覆盖层厚度,实现了 $5\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$ 波段的中红外探测,工作温度提升至 200 K 以上,验证了亚单层量子点结构在硅基光子集成中的可行性,为 InAs 量子点 SOA 与硅基平台的高效集成提供了重要实验参考。2023 年, Al-Nashy^[62]等人采用理论模型研究了 TlBr/BrCl 量子点 SOA 的增益特性,通过优化量子点尺寸、注入电流和温度等参数,在 800 nm 和 3000 nm 波段实现了高增益输出,验证了新型卤化物量子点材料在超宽带光放大中的潜力,为拓展量子点 SOA 的工作波段至中红外区域提供了新的材料选择。

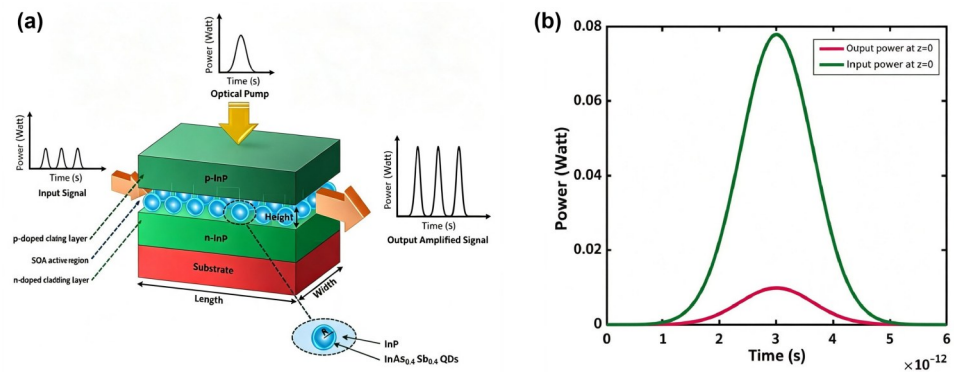


图7 (a)量子点半导体光放大器(QD-SOA)的新型结构;(b)输入信号与放大后输出信号(输入光功率 $P_{in}=10\text{ mW}$)^[52]。
Fig.7 (a) Novel structure of quantum dot semiconductor optical amplifier (QD-SOA); (b) Input signal and amplified output signal (Input optical power $P_{in}=10\text{ mW}$)^[52].

表 4 II–VI 族/InAs 基中红外光放大器研究进展

Table 4 Research Progress of II-VI Group/InAs-Based Mid-Infrared Optical Amplifiers

年份	波长/ μm	增益/dB	带宽/nm	功率/W	测试条件	文献
2014	3.02–3.11	10.03	28	—	–269.15 °C, 脉冲	[50]
2016	2–2.6	3.16/6.18	574/635	7.1/2.8	室温, CW	[45]
2016	4.3	7.78	176	0.00016	室温, 脉冲	[44]
2017	4–6	11.5	2000	—	室温, 脉冲	[42]
2018	3.7	4.47	725	0.573	–196.15 °C, 准 CW	[43]
2018	2.36	9.03	366	140	室温, CW	[47]

梳理 II-VI 族掺杂增益介质的研究进展可以发现,该体系始终需要在增益性能、集成实现能力以及室温工作条件三者之间做取舍。块体多晶材料能够提供极为出色的增益带宽,脉冲能量的提升潜力也十分可观,已有 140 W 连续输出、10 mJ 量级脉冲能量的实验报道,但同时也引出一系列工程层面的挑战,主要集中在热管理、寄生振荡抑制以及整机系统复杂度等方面。现阶段比较有潜力的技术路径主要有几条:开发薄片(thin-disk)增益结构,将增益介质键合至高导热衬底,以此缓解热透镜带来的光束劣化;研究 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 纳米晶、胶体增益材料,尝试在硅基波导上构建复合增益结构,实现波导型放大器^[65–66];采用 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 与 $\text{Fe}:\text{CdSe}$ 等多种 Fe^{2+} 掺杂基质开展光谱合成,拓宽少周期脉冲的放大带宽^[49]。倘若后续能够同时攻克波导集成与室温有效增益两大关键难题,II-VI 族掺杂材料就很有希望成为 3–6 μm 波段兼顾宽带特性与高输出功率的全固态放大方案。

6 结 论

综上所述,InP 基、GaSb 基及其他新型材料体系的中红外 SOA 的研究已取得显著进展,各类器件在波长覆盖、增益性能与集成能力方面各具特色,共同推动了中红外光子系统向集成化、高功

率、实用化方向发展。InP 基材料体系凭借成熟的 MOVPE、MBE 外延生长技术与标准化半导体工艺,在 2–3 μm 波段的 InGaAs/InP 量子阱 SOA 及 3–7 μm 波段的 QCL-SOA 中均展现出优异的器件性能:在增益方面,2 μm 波段硅基异质集成 InP 基 SOA 实现了 27 dB 的片上净增益^[54];在功率方面,5 μm 波段双通道脊波导 QCL 增益介质实现了 2.2 W 连续波输出^[23],16 通道量子级联放大器阵列通过光束合成在 4.8 μm 波段实现了 30 W 脉冲峰值功率^[6]。如何在同一器件中同时实现高增益、高功率与良好光束质量,仍是 InP 基中红外 SOA 走向工程应用需要解决的核心问题。GaSb 基半导体光放大器可覆盖 2–4 μm 短波中红外范围,通过反射式 SOA 结构有效抑制寄生激射,结合微转移印刷等异质集成工艺与硅基微环谐振器混合集成,在宽调谐、高纯度中红外光源及片上光谱传感应用中展现出独特的技术优势与巨大应用潜力。过渡金属掺杂 II-VI 族硫系化物(CdTe 、 ZnS/ZnSe 等)光放大器依托离子内部 d-d 能级跃迁机制,在 3–6 μm 波段实现了超宽带、高增益的光放大,为高功率飞秒脉冲放大提供了全固态解决方案,然而其多晶介质的热导率低、热透镜效应显著,且高增益多通结构易诱发寄生振荡,低温工作需求进一步增加了系统复杂性,制约了器件向

紧凑型、室温运行方向的工程化推广。InAs 量子点及低维异质结构通过能带工程与量子限域效应,将 SOA 工作波段拓展至 $6\text{ }\mu\text{m}$ 以上,但深低温工作需求(通常小于 120 K)与波导损耗过高的问题尚未得到根本解决,距离室温实用化仍有较大差距。

综合比较各材料体系的技术成熟度与适用场景:在室温工作能力方面,GaSb 基与 InP 基 InGaAs 量子阱 SOA 以及 II-VI 族 Cr^{2+} 掺杂体系可在室温下稳定工作,QCL-SOA 已具备室温连续波高功率输出能力, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 亦已实现室温脉冲放大输出^[63],而 Co^{2+} 掺杂 CdTe 体系与 InAs 量子点体系目前仍依赖低温环境、 $\text{Fe}^{2+}:\text{CdSe}$ 的室温增益性能尚不足;在功率水平方面,II-VI 族多晶体系凭借块体增益介质实现了百瓦级连续波与毫焦级脉冲能量输出,居各体系之首,QCL-SOA 及阵列化方案可达瓦级至数十瓦级,GaSb 基与 InP 基波导型 SOA 目前处于毫瓦至百毫瓦量级,更适合片上信号放大;在增益带宽方面,II-VI 族掺杂体系(725 nm 发射带宽、超 1000 nm 增益带宽)与非对称量子阱 GaSb 基设计($>340\text{ nm}$)优势显著,是超宽带与飞秒脉冲放大的首选;在集成方案成熟度方面,InP 基已形成晶圆键合、单片 MOPA 与阵列化的完整集成链条,GaSb 基的微转移印刷与混合集成近年来快速跟进,二者均已具备与硅基光子平台集成的工程化能力,而 II-VI 族块体晶体与 InAs 量子点体系的波导化、片上化集成仍是空白。器件选型时,片上集成传感与通信系统宜优先考虑 InP 基与 GaSb 基方案,高功率、超宽带脉冲放大场景

宜采用 II-VI 族掺杂体系。

在系统应用层面,2024 年,Marsland^[73]等人利用 $4.6\text{ }\mu\text{m}$ 量子级联激光器与高速室温谐振腔红外探测器(RCID)完成了多吉比特每秒量级速率的自由空间激光通信实验,验证了中红外半导体光源在高速自由空间通信链路中的实用化能力;2025 年,Zhou^[74]等人通过波长、偏振与模式复用相结合,采用 4 波长 $\times$ 2 偏振 $\times$ 2 轨道角动量模式的 16 通道架构,实现了总容量 1.024 Tbit/s 的中红外自由空间光通信演示。上述系统级验证为中红外 SOA 作为发射端功率放大与中继放大器件提供了明确的应用牵引。

展望未来,中红外 SOA 的发展需进一步聚焦于高温增益稳定性提升、异质集成耦合损耗降低及规模化制备一致性优化等关键科学问题与技术挑战。在材料层面,需通过热管理优化、新型势垒设计与界面工程,抑制非辐射复合与载流子泄漏,提升器件在室温乃至高温环境下的增益性能;在集成层面,需推进晶圆键合、倒装芯片、微转移印刷等异质集成工艺的标准化与低成本化,实现 SOA 与硅基光子集成电路的高效耦合;在器件结构层面,可探索量子点、超晶格与级联结构的复合设计,兼顾宽带增益与高输出功率,并借助片上光谱合成、多通道阵列及自适应光学等技术拓展系统级应用,催动中红外光子系统向智能化、多功能化方向演进。随着中红外传感、通信与激光系统需求的持续增长,半导体光放大器将在 $2\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ 宽谱窗口中扮演愈发重要的角色,为下一代中红外光子技术提供关键器件支撑。

参 考 文 献:

- [1] HENRY C H. Theory of the linewidth of semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, QE-18(2): 259-264.
- [2] WOOD T H, EWELL L A. Increased received power and decreased modal noise by preferential excitation of low-order modes in multimode optical-fiber transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, LT-4(4):391-395.
- [3] ZEGHUZI A, SCHMECKEBIER H, STUBENRAUCH M, *et al.* 25 Gbit/s differential phase-shift-keying signal generation using directly modulated quantum-dot semiconductor optical amplifiers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 106(21): 213501.
- [4] LEMAITRE F, KLEIJN S, MILLAN-MEJIA A J, *et al.* High density integration of semiconductor optical amplifiers in InP generic photonic integration technology [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2022, 28(6):6101306.
- [5] BIMBERG D. Semiconductor nanostructures for flying q-bits and green photonics [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(7): 1245-1257.
- [6] ZHOU W J, WU D H, LU Q Y, *et al.* Single-mode, high-power, mid-infrared, quantum cascade laser phased arrays [J]. *Sci. Rep.*, 2018, 8:14866.

-
- [7] MAWST L J, BOTEZ D. High-power mid-infrared (3-6 μm) quantum cascade lasers [J]. *IEEE Photon. J.*, 2022, 14(1):1508025.
 - [8] RAUTER P, CAPASSO F. Multi-wavelength quantum cascade laser arrays [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2015, 9(5):452-477.
 - [9] MROZIEWICZ B, PRUSZYNSKA-KARBOWNIK E. On the beam radiance of mid-infrared quantum cascade lasers-a review [J]. *Opto-Electron. Rev.*, 2019, 27(2):161-173.
 - [10] MITSUHARA M, OGASAWARA M, OISHI M, *et al.* Metalorganic molecular beam epitaxy-grown InGaAs/InGaAs multiple quantum well lasers emitting at 2.07 μm wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(24):3106-3108.
 - [11] KUANG G K, BÖHM G, GRAU M, *et al.* 2.12 μm InGaAs-InGaAlAs-InP diode lasers grown in solid-source molecular-beam epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(8):1091-1092.
 - [12] GRANDJEAN N, MASSIES J. Epitaxial growth of highly strained InGaAs on GaAs(001): the role of surface diffusion length [J]. *J. Cryst. Growth*, 1993, 134(1-2):51-62.
 - [13] HARMAND J C, LI L H, PATRARCHE G, *et al.* MOVPE growth of InGaAs/InGaAsP quantum wells for 2.3 μm laser emission [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(3):398-400.
 - [14] LATKOWSKI S, THIJS P, VAN VELDHOFEN P J, *et al.* Small signal modal gain measurement of ridge waveguide semiconductor optical amplifiers operating at 2 μm suitable for active-passive integration [C]. *Proceedings of 2013 IEEE Photonics Conference, Bellevue WA*, 2013:258-259.
 - [15] VOLET N, SPOTT A, STANTON E J, *et al.* Semiconductor optical amplifiers at 2.0- μm wavelength heterogeneously integrated on silicon [C]. *Proceedings of 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose California*, 2016: SM4G.4.
 - [16] VOLET N, SPOTT A, STANTON E J, *et al.* Semiconductor optical amplifiers at 2.0- μm wavelength on silicon [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2017, 11(2):1600165.
 - [17] SHI W, ZOU C, CAO Y, *et al.* The progress and trend of heterogeneous integration silicon/III-V semiconductor optical amplifiers [J]. *Photonics*, 2023, 10(2):161.
 - [18] TROCCOLI M, GMACHL C, CAPASSO F, *et al.* Mid-infrared ($\lambda \sim 7.4 \mu\text{m}$) quantum cascade laser amplifier for high power single-mode emission and improved beam quality [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(22):4103-4105.
 - [19] SLIVKEN S, SENGUPTA S, RAZEGHI M. High power continuous operation of a widely tunable quantum cascade laser with an integrated amplifier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 107(25):251101.
 - [20] SPOTT A, STANTON E J, VOLET N, *et al.* Heterogeneous integration for mid-infrared silicon photonics [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2017, 23(4):2697723.
 - [21] MIDKIFF J, HSIAO P Y, CHEN R T. Mid-infrared optical phased array in an InP-based platform [C]. *Proceedings of 2022 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference, Miramar Beach FL*, 2022:1-3.
 - [22] FEI T, ZHAI S Q, ZHANG J C, *et al.* 3 W continuous-wave room temperature quantum cascade laser grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Photonics*, 2023, 10(1):47.
 - [23] WANG Y, ZHANG Y, WANG J, *et al.* High-power mid-infrared quantum cascade laser with large emitter width [J]. *Photonics*, 2024, 11(3):214.
 - [24] HOLL P, RATTUNDE M, ADLER S, *et al.* Recent advances in power scaling of GaSb-based semiconductor disk lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(6):324-335.
 - [25] SPRENGEL S, DUCHEMIN F, AMANN M-C. Novel InP- and GaSb-based light sources for the near to far infrared [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2016, 31(11):113005.
 - [26] SHTERENGAS L, KIPSHIDZE G, HOSODA T, *et al.* Cascade pumping of 1.9-3.3 μm type-I quantum well GaSb-based diode lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2017, 23(6):1500708.
 - [27] WANG R, MALIK A, SIMONYTE I, *et al.* Compact GaSb/silicon-on-insulator 2.0 μm widely tunable external cavity lasers [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(24):28977-28986.
 - [28] SIA J X B, WANG W, QIAO Z, *et al.* Compact silicon photonic hybrid ring external cavity (SHREC)/InGaSb-AlGaAsSb wavelength-tunable laser diode operating from 1881-1947 nm [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(4):5134-5146.
 - [29] VIZBARAS K, VIZBARAS A, ANDREJEW A, *et al.* Room-temperature type-I GaSb-based lasers in the 3.0-3.7 μm wavelength range [C]. *Proceedings of SPIE Vol. 8277, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XI, San Francisco Califor-*

- nia, 2012:82771B.
- [30] SIFFERMAN S D, NAIR H P, SALAS R, *et al.* Highly strained mid-infrared type-I diode lasers on GaSb [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(6):1502410.
 - [31] VURGAFTMAN I, WEIH R, KAMP M, *et al.* Interband cascade lasers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, 48(12):123001.
 - [32] YANG R Q, SANTOS M B. Interband cascade lasers from a historic perspective to a future outlook [J]. *Photonics*, 2025, 12(2):155.
 - [33] WEI J C, LIN S J, GENG Z Q, *et al.* Ultra-broadband tunable GaSb-silicon hybrid laser for gas spectroscopy [J]. *Photonics Res.*, 2025, 13(10):2913-2920.
 - [34] ARAFIN S, MCFADDEN A P, PENDHARKAR M, *et al.* Recent progress on GaSb-based photonic integrated circuits [C]. *Proceedings of 2018 International Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices, Chengdu Sichuan*, 2018:WeM13.
 - [35] WANG R, SPRENGEL S, VASILIEV A, *et al.* Widely tunable 2.3 μm III-V-on-silicon Vernier lasers for broadband spectroscopic sensing [J]. *Photonics Res.*, 2018, 6(9):858-865.
 - [36] OJANEN S P, VIHIERIALA J, CHERCHI M, *et al.* GaSb diode lasers tunable around 2.6 μm using silicon photonics resonators or external diffractive gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 116(8):081105.
 - [37] ZIA N, TUORILA H, VIHIERIALA J, *et al.* Hybrid silicon photonics DBR laser based on flip-chip integration of GaSb amplifiers and μm -scale SOI waveguides [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(14):24995-25005.
 - [38] BHUIYAN I K A, HILSKA J, PEIL M, *et al.* Design of broadband optical gain in GaSb-based waveguide amplifiers with asymmetric quantum wells [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(2):2515-2529.
 - [39] ZIA N, OJANEN S P, VIHIERIALA J, *et al.* Widely tunable 2 μm hybrid laser using GaSb semiconductor optical amplifiers and a SiN photonics integrated reflector [J]. *Opt. Lett.*, 2023, 48(5):1319-1322.
 - [40] TUORILA H, VIHIERIÄLÄ J, ARAFAT Y, *et al.* Micro-transfer printing of GaSb optoelectronics chips for mid-infrared silicon photonics integrated circuits [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2025, 10(10):2401791.
 - [41] OJANEN S P, VIHIERIALA J, ZIA N, *et al.* Discretely tunable (2594, 2629, 2670 nm) GaSb/SiN hybrid laser for multi-wavelength spectroscopy [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2023, 17(12):2300492.
 - [42] FROLOV M P, GORDIENKO V M, KOROSTELIN Y V, *et al.* Fe-doped CdSe single crystal: growth, spectroscopic and laser properties, potential use as a 6 μm broadband amplifier [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2017, 14(2):025001.
 - [43] TURNER E J, EVANS J W, HARRIS T R, *et al.* Double-pass Co: CdTe mid-infrared laser amplifier [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(9):2948-2953.
 - [44] POTEKIN F V, MIGAL E A, PUSHKIN A V, *et al.* Mid-IR (4-5 μm) femtosecond multipass amplification of optical parametric seed pulse up to gigawatt level in Fe: ZnSe with optical pumping by a solid-state 3 μm laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2016, 13(12):125403.
 - [45] VASILYEV S, MOSKALEV I, MIROV M, *et al.* Multi-watt mid-IR femtosecond polycrystalline Cr: ZnS and Cr: ZnSe laser amplifiers with the spectrum spanning 2.0-2.6 μm [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(2):1616-1623.
 - [46] VASILYEV S, MOSKALEV I, MIROV M, *et al.* Ultrafast middle-IR lasers and amplifiers based on polycrystalline Cr: ZnS and Cr: ZnSe [J]. *Opt. Mater. Express*, 2017, 7(7):2636-2650.
 - [47] MIROV S, MOSKALEV I, VASILYEV S, *et al.* Frontiers of mid-IR lasers based on transition metal doped chalcogenides [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2018, 24(6):1-16.
 - [48] ANDORF M B, LEBEDEV V A, PIOT P. Single-pass Cr: ZnSe amplifier for broadband infrared undulator radiation [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(18):26601-26611.
 - [49] PUSHKIN A, POTEKIN F. Refining the performance of mid-IR CPA laser systems based on Fe-doped chalcogenides for nonlinear photonics [J]. *Photonics*, 2023, 10(12):1375.
 - [50] LU Q, ZHUANG Q, HAYTON J, *et al.* Gain and tuning characteristics of mid-infrared InSb quantum dot diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(3):031115.
 - [51] YADAV N, BHARDWAJ G, ANJUM S G, *et al.* Investigation of high optical gain in complex type-II InGaAs/InAs/GaAs-Sb nano-scale heterostructure for MIR applications [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(15):4243-4249.
 - [52] EYVAZI M, YADIPOUR R, ROSTAMI A. All-optical broadband QDs semiconductor optical amplifier (QDs-SOA): in-

- homogeneous broadening [J]. *IEEE Access*, 2024, 12:47993-48003.
- [53] HECK M J R, BOGAERTS W, DAVENPORT M L. Energy-efficient semiconductor optical amplifier with longitudinally varying confinement factor [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(2):301.
- [54] VAN GASSE K, WANG R, ROELKENS G. 27 dB gain III-V-on-silicon semiconductor optical amplifier with >17 dBm output power [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(1):293-302.
- [55] DAVENPORT M L, HECK M J R, PARKIN S P, *et al.* Heterogeneous silicon/III-V semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2016, 22(6):3100111.
- [56] ZHANG M, ZHANG Y, WANG Y, *et al.* Low-polarization, broad-spectrum semiconductor optical amplifiers [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(11):969.
- [57] DE BEECK COP, DE KONINCK Y, VAN CAMPENHOUT J, *et al.* Heterogeneous III-V on silicon nitride amplifiers and lasers via microtransfer printing [J]. *Optica*, 2020, 7(4):386-393.
- [58] DHINGRA K, LEE M L, BOTEZ D, *et al.* 8.5 μm -emitting InP-based quantum cascade lasers grown on GaAs by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 121(14):141102.
- [59] LEHNHARDT T, HUMMER M, RÖSSNER K, *et al.* Continuous wave single mode operation of GaInAsSb/GaSb quantum well lasers emitting beyond 3 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(18):183508.
- [60] KASHANI-SHIRAZI K, VIZBARAS K, BACHMANN A, *et al.* Low-threshold strained quantum-well GaSb-based lasers emitting in the 2.5- to 2.7- μm wavelength range [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, 21(16):1106-1108.
- [61] GUO D, HUANG J, BENAMARA M, *et al.* High operating temperature mid-infrared InGaAs/GaAs submonolayer quantum dot quantum cascade detectors on silicon [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2023, 59(2):1-6.
- [62] AL-NASHY B O, AL-MOSAWI B T S, OLEIWI M O, *et al.* Gain of TlBr/BrCl quantum dot semiconductor optical amplifier [J]. *J. Electr. Comput. Eng.*, 2023, 2023:1941232.
- [63] MARTYSHKIN D, KARKI K, FEDOROV V, *et al.* Room temperature, nanosecond, 60 mJ/pulse Fe:ZnSe master oscillator power amplifier system operating at 3.8-5.0 μm [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(2):2387-2393.
- [64] FEDOROV V, MARTYSHKIN D, KARKI K, *et al.* Q-switched and gain-switched Fe:ZnSe lasers tunable over 3.60-5.15 μm [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(10):13934-13941.
- [65] MIROV S B, FEDOROV V V, MARTYSHKIN D V, *et al.* Progress in mid-IR Cr^{2+} and Fe^{2+} doped II-VI materials and lasers [J]. *Opt. Mater. Express*, 2011, 1(5):898-919.
- [66] MIROV S B, FEDOROV V V, MOSKALEV I S, *et al.* Progress in Cr^{2+} and Fe^{2+} doped mid-IR laser materials [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2010, 4(1):21-41.
- [67] RAUTER P, MENZEL S, *et al.* Master-oscillator power-amplifier quantum cascade laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(26):261117.
- [68] RAUTER P, MENZEL S, *et al.* High-power arrays of quantum cascade laser master-oscillator power-amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(4):4518-4530.
- [69] RAGHUNATHAN V, BORLAUG D, RICE R R, *et al.* Demonstration of a mid-infrared silicon Raman amplifier [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(22):14355-14362.
- [70] LIU X, OSGOOD R M, VLASOV Y A, *et al.* Mid-infrared optical parametric amplifier using silicon nanophotonic waveguides [J]. *Nat. Photonics*, 2010, 4(8):557-560.
- [71] ARAFAT Y, GHOSH S, BARBIER C, *et al.* Micro transfer printed semiconductor optical amplifier at the 2 μm waveband onto SOI [C]. *Proceedings of 2025 IEEE Silicon Photonics Conference, London UK*, 2025:1-2.
- [72] WANG Y Q, JIA H, PARK J S, *et al.* Mid-infrared InAs/InP quantum-dot lasers [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2026, 15(1):64.
- [73] MARSLAND R, JACOBS S, CANEDY C L, *et al.* Multi-Gb/s free-space laser communication at 4.6- μm wavelength using a high-speed, room-temperature, resonant-cavity infrared detector (RCID) and a quantum-cascade laser [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(13):22479-22492.
- [74] ZHOU H, ZUO Y, ALHADDAD A, *et al.* Demonstration of 1.024-Tbit/s 16-channel mid-IR free-space optical communications by combining wavelength, polarization, and mode multiplexing [C]. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2025. Washington, DC: Optica Publishing Group*, 2025:Th4A.6.
- [75] OJANEN S P, ZIA N, VIHARIÄLÄ J, *et al.* Hybrid integrated GaSb/Si₃N₄ narrow linewidth (<50 kHz) distributed

- Bragg reflector laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 125(9):091106.
- [76] DAL CIN S, WINDISCHHOFFER A, PILAT F, *et al.* An interband cascade laser based heterodyne detector with integrated optical amplifier and local oscillator [J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(10):1759-1764.
- [77] WEI J, GENG Z, HUANG K, *et al.* Widely tunable short-wave mid-infrared hybrid lasers enabled by a single ultra-compact silicon microring resonator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 127(3):033301.
- [78] WEI J, GENG Z, LIN S, *et al.* Photonic integrated tunable and narrow-linewidth lasers spanning the 2-3 μm wavelength range for spectroscopic sensing [J]. *ACS Photonics*, 2026, 13(14):3972-3979.



赵新龙(2001-),男,山东潍坊人,硕士研究生在读,2023年于青岛大学获得学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生,主要从事中红外量子级联光放大器的研究。

E-mail: zhaoxinlong23@mails.ucas.ac.cn



孟博(1984-),男,辽宁辽阳人,博士研究生学历,研究员,博士生导师,2007年在哈尔滨工程大学理学院获学士学位,2015年在南洋理工大学电气电子工程学院获博士学位。主要从事量子级联激光器的研究。

E-mail: mengbo@ciomp.ac.cn