

基于波长不敏感氮化硅外腔的 宽调谐范围混合集成激光器

高亚飞¹, 李雅诗¹, 邱 阳¹, 董 渊¹, 钟其泽^{1,2}, 胡 挺^{1,2*}

(1. 上海大学 微电子学院, 上海 201800; 2. 上海市汽车智能交互芯片与系统重点实验室, 上海 201800)

摘 要： 外腔激光器凭借窄线宽、宽波长调谐范围等特点被广泛应用于光通信等领域, 然而在结构紧凑且波长调谐范围大于100 nm的器件方面仍面临挑战。通过对微环谐振器(MRRs)以及萨格纳克环中的定向耦合器(DCs)进行针对性设计, 有效抑制了外腔反射谱的波长敏感性。经优化后, 所研制的器件在维持外腔结构精简的前提下, 实现了135 nm的波长调谐范围, 工作波段覆盖1 489~1 624 nm。其边模抑制比(SMSR)在整个调谐范围内均超过57 dB, 并在反射型半导体光放大器(RSOA)增益峰值波长处达到67 dB。此外, 激光器芯片最大输出功率可达19.7 mW。

关键词： 外腔激光器; 定向耦合器; 波长调谐范围

中图分类号： TN248.4 **文章编号：** 1001-5868(2026)04-0601-06

Hybrid Integrated Tuning-Range Laser Using Wavelength-Insensitive Si₃N₄ External Cavity

GAO Yafei¹, LI Yashi¹, QIU Yang¹, DONG Yuan¹, ZHONG Qize^{1,2}, HU Ting^{1,2}

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN; 2. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Connected Vehicle Interaction Chip and System, Shanghai 201800, CHN)

Abstract: External-cavity lasers (ECLs) are widely used in optical communication systems owing to their narrow linewidths and broad wavelength-tuning ranges. However, considerable challenges remain in the development of structurally compact devices with wavelength-tuning ranges exceeding 100 nm. By optimizing the design of directional couplers within microring resonators (MRRs) and the Sagnac loop, the wavelength dependence of the external-cavity reflection spectrum is effectively suppressed. This optimization enables a broad tuning range of 135 nm spanning from 1 489 to 1 624 nm, with a simplified external-cavity configuration. A side-mode suppression ratio (SMSR) exceeding 57 dB is achieved across the entire tuning spectrum, where a peak of 67 dB is achieved at the maximum-gain wavelength of a reflective semiconductor optical amplifier (RSOA). Additionally, a maximum output power of 19.7 mW is obtained from the laser.

Key words: external-cavity laser; directional couplers; wavelength tuning range

0 引言

半导体激光器^[1-2]因其具备窄线宽、高输出功率、高边模抑制比(SMSR)以及超宽波长可调谐范

围等特点, 被广泛应用于光通信^[3-5]、光学传感^[6]以及激光雷达^[7-9]等领域。常见的可调谐半导体激光器的结构主要有以下三种: 分布式反馈(DFB)激光器^[10-11]、采样光栅分布式布拉格反射(SG-DBR)激

收稿日期: 2026-04-23.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFA1209100); 国家自然科学基金项目(62575166); 上海市科研计划项目(25TS1410400, 24JD1401800).

* 通信作者: 胡 挺

光器^[12]以及外腔激光器(ECL)^[13-16]。在DFB激光器中,波长的调谐通常依赖于光栅有效折射率的变化。然而,由于材料本身热光系数的固有限制,实现约40 nm的调谐范围通常需要复杂的12通道DFB阵列结构。除此之外,SG-DBR激光器在提高调谐范围方面亦面临着类似的结构性约束。而通过引入游标滤波器等结构的ECL可借助游标效应实现拓展波长调谐范围的功能,同时保持较高的SMSR以及较窄的线宽。

外腔结构主要基于硅(Si)^[17-19]、铌酸锂(LN)^[16,20-21]以及氮化硅(Si₃N₄)^[6,22-25]等平台实现。与硅波导相比,氮化硅波导具有更低的传输损耗和更高的非线性阈值,这对于实现窄线宽和高输出功率至关重要。此外,绝缘体上薄膜铌酸锂(LNOI)波导通常需要更大的弯曲半径以及更长的电光调制区,不利于紧凑且具有超宽波长调谐范围的外腔激光器的设计。因此,氮化硅平台在实现低调谐复杂度及宽波长调谐范围的激光器设计方面提供了更具优势的解决方案。

在多种外腔结构中,微环谐振器(MRR)由于具有较大的自由光谱范围(FSR)和较窄的通带,常被用作外腔结构中的模式选择滤波器。MRR与总线波导之间的耦合部分通常通过定向耦合器(DC)实现。然而,传统DC的功率耦合系数(PCC)具有显著的波长敏感性。在由多个MRRs构成的游标滤波结构中,倏逝场穿的透深度会随着波长的增大而增加,从而导致PCC增大,进而降低外腔反射谱的模式抑制比(MSR)。而在萨格纳克环(Sagnac loop)中,较短波长下倏逝场的穿透会减弱,这会使得PCC减小,从而引入更大的传输损耗。上述两种效应均会显著限制ECL的波长调谐范围。虽然可以通过引入可调谐的Sagnac loop,增加额外的MRRs^[22]或马赫-曾德尔干涉仪(MZIs)^[19]等结构提升FSR,进而实现波长调谐范围的拓展,但是此类附加结构不可避免地增加了系统的调谐复杂度,并降低了器件的集成密度。

本文提出并实验验证了一种基于III-V族反射型半导体光放大器(RSOA)与Si₃N₄外腔混合集成的具有超宽波长调谐范围的ECL。针对传统耦合结构所固有的带宽限制问题,在MRRs及Sagnac loop中引入了波长不敏感弯曲定向耦合器(WICDCs)^[26-27]。该结构利用弯曲波导所引入的传播常数差异,有效抑制了PCC的波长敏感性,从而

在宽光谱范围内实现了稳定且均匀的反射特性。基于此优化设计,所提出的外腔激光器实现了135 nm的超宽波长调谐范围,其SMSR在整个调谐区间内均高于57 dB,且输出功率可达19.7 mW。上述结果提供了一种实现紧凑型、高性能外腔激光器的可行技术途径。

1 器件设计

如图1(a)所示,本文设计的ECL由一段长度为1 mm的RSOA(GC-SF-1000-C)以及Si₃N₄外腔构成。RSOA与Si₃N₄外腔耦合处的端面反射率低于0.1%,以有效抑制端面反射;其另一端面反射率高于90%,用来当作激光谐振腔的前端反射镜。Si₃N₄波导的宽度和高度分别设计为1 μm和0.3 μm。在RSOA与Si₃N₄波导的耦合界面处设计了一段模斑转换器(SSC),其宽度由350 nm渐变至1 μm,以提升RSOA与Si₃N₄外腔的耦合效率。游标滤波器则是由两个PCC均为10%、但周长不同的MRRs串联组成,用于实现波长选择,其中MRR₁和MRR₂的周长分别为480.4 μm和489.8 μm。在外腔末端设计了一种反射率为80%的Sagnac loop,作为谐振腔的后反射镜。

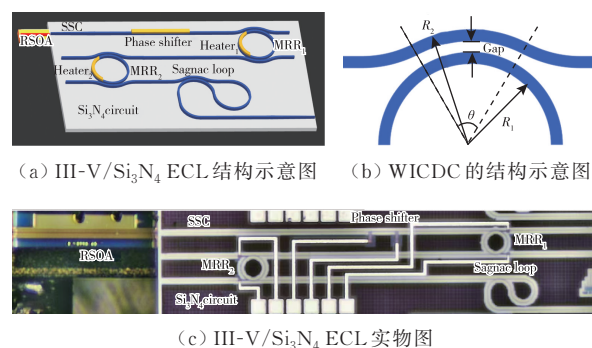


图1 器件结构示意图

氮化硅外腔中所采用的WICDCs的结构如图1(b)所示,其关键几何参数包括内弯曲半径(R_1)、外弯曲半径(R_2)、耦合角度(θ)以及耦合间隙(Gap)。通过使用时域有限差分法(FDTD)仿真设计了两种具有不同结构参数的WICDCs。将用于MRRs以及Sagnac loop中的WICDCs的PCC分别设定为0.1与0.29,其结构参数分别为 $R_1=60\ \mu\text{m}$ 、 $R_2=61.37\ \mu\text{m}$ 、 $\theta=19.8^\circ$ 、 $\text{Gap}=380\ \text{nm}$ 和 $R_1=80\ \mu\text{m}$ 、 $R_2=81.37\ \mu\text{m}$ 、 $\theta=15.2^\circ$ 、 $\text{Gap}=390\ \text{nm}$ 。如图2(b)与图2(d)中蓝色曲线所示,在1480~1620 nm的宽波

长范围内,两种耦合器的PCC均能够稳定维持在其目标设计值附近,表明WICDCs能够有效抑制PCC的波长敏感性,从而为扩展激光器波长调谐范围提供了可行实现路径。为实现稳定的单纵模激射,需要较高的外腔反射谱的MSR。从理论角度出发,外腔反射谱的MSR至少应达到2 dB^[28-29]才能保证稳定的单纵模激光输出,而在实际器件设计中,该值通常被设计为大于3 dB。如图2(a)所示,传统DC的波长敏感性会对外腔反射谱的MSR造成显著影响。随着波长由1 480 nm增加至1 620 nm,PCC由0.1增加至0.23。与此同时,MSR由4.03 dB下降至1.05 dB。当波长超过1 545 nm时,MSR显然已经小于2 dB,表明在该波长区间内无法实现稳定的单纵模激射。相比之下,如图2(b)所示,在采用WICDCs后,PCC在1 480~1 620 nm波长范围内被有效限制在0.093~0.105之间,从而使MSR稳定维持在3.67~4.43 dB之间,满足单纵模激射对MSR的基本要求。

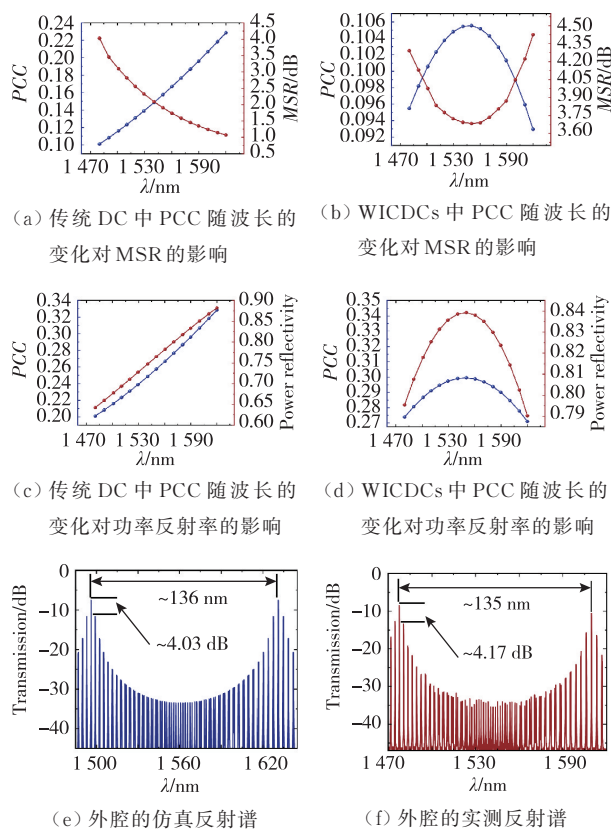


图2 器件性能仿真与测试

如图2(c)所示,传统DC的波长敏感性也会导致Sagnac loop的反射率发生明显变化。随着波长由1 480 nm增加至1 620 nm,PCC由0.20上升至

0.33,相应地,反射率由0.64提高至0.88。根据损耗表达式 $\alpha=10\cdot\log_{10}(P_{\text{out}}/P_{\text{in}})$,其中 P_{in} 表示输入功率, P_{out} 表示经Sagnac loop反射后的输出功率,可以算出在1 480 nm处的外腔传输损耗相较于1 620 nm高出1.383 dB。相比之下,如图2(d)展示了采用WICDCs后的结果,PCC在同一波长范围内被稳定限制在0.27~0.30之间,对应反射率维持在0.79~0.84。此时,在最低反射率条件下的传输损耗仅比最高反射率条件下的损耗高0.267 dB。综上所述,WICDCs的引入有效提升了外腔反射谱的MSR的稳定性并降低了外腔传输损耗,从而能够显著拓展ECL的波长调谐范围。

限制ECL波长调谐范围的主要因素之一为RSOA的增益谱特性。鉴于所采用的RSOA的3 dB增益带宽低于100 nm,本工作仅将外腔激光器的FSR设计为136 nm,以验证采用WICDCs后的MRRs和Sagnac loop能够有效提高波长调谐范围。图2(e)所示为基于传输矩阵法(TMM)计算得到的外腔反射谱,在引入WICDCs后,实现了136 nm的FSR,同时MSR达到了4.03 dB,满足稳定的单纵模激射要求。

2 实验结果

Si_3N_4 外腔的制备工艺流程如下:首先采用低压化学气相沉积(LPCVD)制备 Si_3N_4 薄膜,并利用氪氟(KrF)深紫外光刻系统进行图形化定义;随后进行干法刻蚀、光刻胶去除及晶圆清洗;最后通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)沉积厚度为2.2 μm的 SiO_2 包层并完成Ti/TiN热光移相器及AlCu电极的沉积与刻蚀。在此基础上开展深硅刻蚀工艺,并对刻蚀后形成的硅台阶进行抛光处理,以实现RSOA与 Si_3N_4 外腔之间的高效耦合。最终,将RSOA与已制备的 Si_3N_4 外腔在光学对准平台上完成对准,其实物图如图1(c)所示。

首先是外腔反射谱的测试,在将透镜光纤与 Si_3N_4 波导完成对准后,通过施加电压来调整两个MRRs的谐振峰位置,使其完美对准。所测得的外腔反射谱如图2(f)所示,其FSR为135 nm。由游标效应产生的两个谐振峰的MSR均超过4 dB,与图2(e)中的仿真结果具有良好的一致性。

如图3(a)所示,利用光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA AQ6370D)测得RSOA在不同注入

电流条件下的放大自发辐射(ASE)谱。随着注入电流由 50 mA 增加至 300 mA,其 3 dB 增益带宽由 55 nm 扩展至 95 nm,该结果为 FSR 的设计提供了参考依据。将 RSOA 与 Si_3N_4 外腔完成对准后,通过对各功能单元施加相应控制电压来完成对 ECL 的性能表征。如图 3(b)所示,利用 OSA 测得不同工作状态下的叠加激光光谱。通过独立调控 MRR_1 与 MRR_2 上的热光电极,实现了在 1 489~1 624 nm 范围内连续无跳模调谐激射,其对应调谐范围为 135 nm。进一步对整个调谐区间内的 SMSR 进行分析,如图 3(c)所示,在整个波长调谐范围内, SMSR 始终保持在 57 dB 以上,并在 1 560 nm 处达到约 67 dB 的最大值,该波长对应图 3(a)中 RSOA 的增益峰值位置。图 3(d)给出了不同激射波长对应的施加于 MRR_1 与 MRR_2 上的电压大小。在 Si_3N_4 外腔中, Ti/TiN 热光移相器的方块电阻为 $11\ \Omega/\text{sq}$,对应微环谐振器电极总电阻为 $1\ 334\ \Omega$ 。基于图 3(d)所示的电压与激射波长的关系,可进一步推算得到器件的热调谐效率约为 $0.27\ \text{nm/mW}$ 。

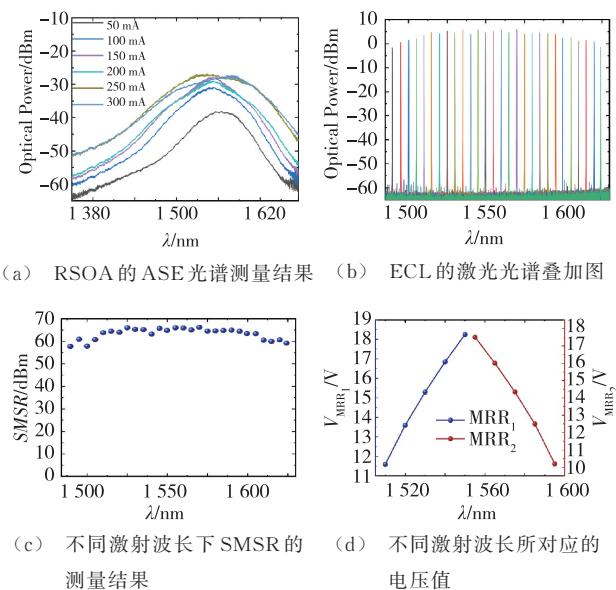


图3 激光输出性能

图 4 展示了在 1 560 nm 的激射波长下,输出功率随注入电流的变化曲线。在测试过程中,首先对光学对准平台进行调试,尽可能降低 RSOA 与 Si_3N_4 外腔之间的耦合损耗。随后调节两个 MRRs 上的热电极,使两个 MRRs 的谐振峰精确对齐。在此基础上进一步微调总线波导上的移相器,以实现激射模式与游标滤波器谐振峰的最佳匹配,从而获得最大的输出功率。测试结果表明,该激光器的阈值电

流约为 50 mA。随着注入电流的增加,在 300 mA 时达到芯片端面最大输出功率 19.7 mW。

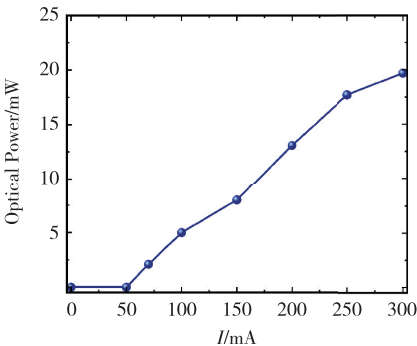


图4 输出功率随注入电流变化的关系曲线

表 1 展示了近期报道的 ECLs 与本工作的性能对比。本工作所实现的波长调谐范围显著大于采用双微环调谐结构的 Si_3N_4 ECLs^[23-24],并优于引入第三个 MRR^[22]或 MZI^[19]的方案,并且在输出功率与 SMSR 方面亦表现出更优的性能。尽管文献[31]报道了 172 nm 的波长调谐范围,但其外腔结构相对复杂,且 SMSR 在整个调谐谱范围内均匀性较差。此外,文献[30]通过引入基于硅波导的 WICDCs 实现了 145 nm 的调谐范围,但其最小 SMSR 仅为 29.6 dB,且在 Sagnac loop 中未采用 WICDCs 结构。相比之下,本工作在游标滤波器与 Sagnac loop 中均引入了 WICDCs,在实现了 135 nm 的波长调谐范围的同时,其 SMSR 在整个波长调谐范围内均大于 57 dB,该数值甚至高于文献[30]中所报道的最大 SMSR。此外,通过优化外腔结构设计,当两个 MRRs 的周长分别设定为 $408.2\ \mu\text{m}$ 和 $415.11\ \mu\text{m}$ 时,理论计算得到的外腔反射谱的 FSR 可达 184.31 nm,同时在整个波段范围内的 MSR 均维持在 3 dB 以上。这表明,在 RSOA 的增益谱足够宽的条件,所提出的基于 WICDCs 的 ECL 具备实现超过 180 nm 波长调谐范围的潜在能力。

表 1 可调谐外腔激光器的性能比较

外腔材料	外腔结构	调谐范围/nm	输出功率/mW	边模抑制比/dB
氮化硅 ^[10]	双微环+可调萨格纳克环	172	26.7	>40~74
硅 ^[19]	双微环+马赫-曾德尔干涉仪	99	8.9	>29
氮化硅 ^[22]	三微环	118	15	>30
氮化硅 ^[23]	双微环	50	10	>50
氮化硅 ^[24]	双微环	46	6	>52
硅 ^[30]	双微环	145	13.07	>29.6~47
本工作	双微环	135	19.7	>57~67

3 结论

基于 III-V/Si₃N₄ 外腔混合集成平台, 本工作实现了一种具有超宽波长可调谐范围的 ECL。该设计在基于双 MRRs 的游标滤波器及 Sagnac loop 中同时引入 WICDCs, 有效抑制了 PCC 的波长敏感性, 进而提高了外腔反射谱中 MSR 的稳定性以及减小了外腔损耗。该器件最终实现了 135 nm 的波长调谐范围。在整个调谐范围内, 其 SMSR 始终高于 57 dB, 并在 RSOA 增益峰值波长处达到 67 dB 的最大值。同时, 芯片端面输出功率最高可达 19.7 mW。进一步分析表明, 在 RSOA 增益谱足够宽的前提下, 通过优化 Si₃N₄ 外腔的结构参数, 所提出的基于 WICDCs 的 ECL 有望实现超过 180 nm 的波长调谐范围。该工作为硅光子集成电路提供了一种切实可行的片上光源解决方案。

参考文献:

- [1] Porter C, Zeng S, Zhao X, et al. Hybrid integrated chip-scale laser systems[J]. *APL Photonics*, 2023, 8(8): 080902.
- [2] 王宽宽, 陈泉安, 蒋春, 等. 多通道干涉大范围可调谐激光器[J]. *半导体光电*, 2022, 43(2): 273-279.
Wang Kuankuan, Chen Quan'an, Jiang Chun, et al. Multi-channel interference widely-tunable laser[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(2): 273-279.
- [3] Hamaoka F, Nakamura M, Okamoto S, et al. Ultra-wideband WDM transmission in S-, C-, and L-bands using signal power optimization scheme[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(8): 1764-1771.
- [4] Yang C, Liang L, Qin L, et al. Advances in silicon-based, integrated tunable semiconductor lasers[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(2): 197-217.
- [5] Ferrari A, Napoli A, Fischer J K, et al. Assessment on the achievable throughput of multi-band ITU-T G. 652. D fiber transmission systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4279-4291.
- [6] Ignesti E, Tommasi F, Fini L, et al. A new class of optical sensors: a random laser based device[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35225.
- [7] Zhu Y, Zeng S, 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.
- [8] Huang L, Yang C, Liang L, et al. Integrated light sources based on micro-ring resonators for chip-based LiDAR[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(2): 2400343.
- [9] Watts M R, Poulton C, Byrd M, et al. Lidar on a chip enters the fast lane: sensors for self-driving cars and robots will be tiny, reliable, and affordable[J]. *IEEE Spectrum*, 2023, 60(9): 38-43.
- [10] Sun Y, Salamy J, Murray C E, et al. Self-locking of free-running DFB lasers to a single microring resonator for dense WDM[C]//2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2024: 1-3.
- [11] Shi Y, Xiang S, Guo X, et al. Photonic integrated spiking neuron chip based on a self-pulsating DFB laser with a saturable absorber[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(8): 1382.
- [12] Shi K, Smyth F, Anandarajah P M, et al. Linewidth of SG-DBR laser and its effect on DPSK transmission[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(24): 5040-5045.
- [13] 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]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21713.
- [14] van Rees A, Fan Y, Geskus D, et al. Ring resonator enhanced mode-hop-free wavelength tuning of an integrated extended-cavity laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5669.
- [15] Kobayashi N, Sato K, Namiwaka M, et al. Silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(6): 1241-1246.
- [16] Li M, Chang L, Wu L, et al. Integrated poekels laser[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5344.
- [17] de Valicourt G, Chang C M, Eggleston M S, et al. Hybrid-integrated wavelength and reflectivity tunable III - V/silicon transmitter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(8): 1376-1382.
- [18] Malik A, Guo J, Tran M A, et al. Widely tunable, heterogeneously integrated quantum-dot O-band lasers on silicon[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(10): 1551.
- [19] Kita T, Tang R, Yamada H. Compact silicon photonic wavelength-tunable laser diode with ultra-wide wavelength tuning range[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(11): 111104.
- [20] Han Y, Zhang X, Ma R, et al. Widely tunable O-band lithium niobite/III-V transmitter[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 35478.
- [21] Ren Y, Xiong B, Yu Y, et al. Widely and fast tunable external cavity laser on the thin film lithium niobate platform[J]. *Optics Communications*, 2024, 559: 130415.
- [22] Morton P A, Xiang C, Khurgin J B, et al. Integrated coherent tunable laser (ICTL) with ultra-wideband wavelength tuning and sub-100 Hz lorentzian linewidth[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(6): 1802-1809.
- [23] Lin Y, Browning C, Timens R B, et al. Characterization of hybrid InP-TriPleX photonic integrated tunable lasers based on silicon nitride (Si₃N₄/SiO₂) microring resonators for optical coherent system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 1400108.
- [24] Zhu Y, Zhu L. Narrow-linewidth, tunable external cavity

- dual-band diode lasers through InP/GaAs-Si(3)N(4) hybrid integration[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2354-2362.
- [25] Oldenbeuving R M, Klein E J, Offerhaus H L, et al. 25 kHz narrow spectral bandwidth of a wavelength tunable diode laser with a short waveguide-based external cavity [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(1): 015804.
- [26] Xu H, Liu L, Shi Y. Polarization-insensitive four-channel coarse wavelength-division (de)multiplexer based on Mach - Zehnder interferometers with bent directional couplers and polarization rotators[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1483-1486.
- [27] El-Saeed A H, Elshazly A, Kobbi H, et al. Low-loss silicon directional coupler with arbitrary coupling ratios for broadband wavelength operation based on bent waveguides [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(17): 6011-6018.
- [28] Chung Y, Kim D G, Dagli N. Widely tunable coupled-ring reflector laser diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(9): 1773-1775.
- [29] Chen Q, Lu Q, Guo W. Theory and simulation of multi-channel interference (MCI) widely tunable lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18040.
- [30] Iwanaga K, Tomimura Y, Kita T. Silicon photonics hybrid wavelength tunable laser diode using curved directional couplers with 145 nm tunable range [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2024, 63(3): 03SP52.
- [31] Guo Y, Li X, Jin M, et al. Hybrid integrated external cavity laser with a 172-nm tuning range[J]. APL Photonics, 2022, 7(6): 066101.

作者简介:

高亚飞(2001—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光器的研究;

胡挺(1983—),男,教授,主要从事硅基集成光电子器件及微纳加工与集成技术的研究。