

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

杜悦宁^{1,2}, 陈超^{1*}, 秦莉^{1*}, 张星¹, 陈泳屹¹, 宁永强¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:随着超高速光互连、相干光通信、相干检测等技术的不断发展,对激光光源的线宽、相频噪声、可调谐性和稳定性等都提出了更为严格的要求。利用基于CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)工艺的硅光子芯片与半导体增益芯片各自的优势,将二者准单片集成实现结构紧凑、低功耗和高稳定性的窄线宽半导体激光器成为近年的研究热点。该结构可通过微环谐振器、环形反射镜和马赫曾德干涉仪等提供光反馈压窄线宽,并实现宽调谐范围和稳定功率输出。本文主要阐述了硅光子芯片外腔半导体激光器的最新研究进展,针对几种包含微环谐振器的结构进行了分类介绍,深入讨论了增加耦合效率和降低端面反射率等技术难题。针对未来空间光通信和光互连等应用前景,展望了该类激光器在功率提升和光子集成方面的未来发展方向。

关键词:窄线宽;可调谐激光器;硅光子芯片;外腔;半导体激光器

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20191202.0229

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

DU Yue-ning^{1,2}, CHEN Chao^{1*}, QIN Li^{1*}, ZHANG Xing¹, CHEN Yong-yi¹, NING Yong-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

* Corresponding author, E-mail: chenc@ciomp.ac.cn; qinl@ciomp.ac.cn

Abstract: With the development of ultra-high speed optical interconnection, coherent optical communication and coherent detection technology, more stringent requirements are put forward for the linewidth, power and stability of laser source. Based on their own different advantages of silicon photonic chip using CMOS (Comple-

收稿日期:2018-03-21; 修订日期:2018-05-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFE0126800);国家自然科学基金资助项目(No. 61505206, No. 61674148, No. 51672264, No. 61727822);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20150520089JH, No. 20170204013GX)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFE0126800); National Natural Science Foundation of China (No. 61505206, No. 61674148, No. 51672264, No. 61727822); Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20150520089JH, No. 20170204013GX)

mentary Metal Oxide Semiconductor) technology and semiconductor gain chip, the narrow linewidth semiconductor laser with compact structure, low power consumption and high stability can be realized by one single silicon photonic chip and one single semiconductor gain chip integrations, which becomes a hotspot in recent years. The structure can provide the optical feedback to narrow the linewidth by microring resonator, loop mirror and Mach-Zehnder interferometer, and realize the wide tuning range and stable output power. In this paper, the latest research progress of silicon photonic chip external cavity semiconductor laser and several structures containing microring resonators are introduced, and the technical problems, such as increasing the coupling efficiency and reducing the reflectivity of the end face, are discussed in detail. For future applications of space optical communication and optical interconnection, we prospect the future research direction of such lasers in power upgrading and photonic integration.

Key words: narrow linewidth; tunable laser; silicon photonic chip; external cavity; semiconductor laser

1 引言

窄线宽半导体激光器因具有高相干性、低相频噪声、高频率稳定性以及宽波长调谐潜能,而成为超高速光通信、远距离空间激光通信、超高分辨率激光雷达和光学传感等领域的核心器件。例如,在 100 Gbps 和超 100 Gbps 高速光通信系统中,数据负载的激增推动了 16-QAM、64-QAM^[1] 等更高阶正交幅度调制方案的使用,其对相位噪声容限较低,要求激光器具有全 C 波段可调谐性,并且线宽低于 300 kHz 甚至 100 kHz^[2];而星地、星际间空间激光通信对激光光源的要求更为严苛^[3-4],除了需要满足长距离链路、高速率和大容量数据传输对激光线宽和功率的要求,还需克服苛刻的空间环境和干扰,保证长期工作的可靠性和稳定性。此外,基于多普勒频移的相干激光雷达^[5],其激光光源的线宽则决定着识别目标的准确性和精度。

目前,窄线宽半导体激光器的研究方案众多,包括基于衍射光栅、标准具等分立元件的外腔结构、集成取样光栅或表面光栅的单片集成结构以及硅基光子芯片 (SPC) 外腔的准单片集成结构^[6-44]。尽管分布反馈 (DFB) 和分布布拉格反射 (DBR) 式单片集成激光器具有集成度高、结构紧凑和功耗低等优点,但其线宽严重受限于谐振腔长度及损耗等因素^[15];衍射光栅外腔激光器虽然线宽性能优异、调谐范围广,但其体积较大、封装

复杂、光路对准困难、机械调谐滞后严重,这将降低激光器可靠性;SPC 外腔窄线宽半导体激光器 (SPC-SL) 是将增益芯片与外腔芯片准单片集成,它兼具单片集成结构的高可靠和低功耗特性,以及外腔结构的窄线宽和宽调谐特性,逐渐成为窄线宽半导体激光器研究领域的热点。

本文简要介绍了 SPC-SL 实现窄线宽和宽波长范围调谐的基本原理,并系统讨论了近年来 SPC-SL 的研究进展。通过比较 SPC 外腔谐振器的不同选频结构,深入分析了该类型激光器在波长精确锁定、线宽窄化、功率稳定和波长调谐范围等方面的研究趋势。此外,对研究过程中存在的耦合效率提升和腔面反射率抑制等技术难点进行了探讨,并对其未来研究方向及应用前景进行了展望。

2 SPC-SL 基本结构和工作原理

2.1 基本结构

SPC-SL 主要由两部分组成,包括半导体增益芯片或反射式半导体光放大器 (SOA) 和 SPC 外腔谐振器,二者通过模斑转换器 (SSC) 高效耦合实现准单片集成。通常增加谐振腔长度可以有效压窄线宽,但是这将导致纵模激射数量增多,纵模间增益差减小,多模振动变得显著,使获得稳定单模振荡和极窄光谱线宽变得困难。在 SPC-SL 激光器中,通常选择高 Q 值因子的微环谐振器 (MRR) 作为选频和锁模元件,因为 MRR 具有较

宽的自由光谱区(FSR),可以有效避免上述问题的发生。具体来说 MRR 可以通过增加有效腔长提高光子寿命、提供负光学反馈和注入锁定,实现线宽压窄、相频噪声和相对强度噪声(RIN)抑制,并利用 MRR 的游标卡尺效应实现宽波长范围调谐。图1给出了窄线宽 SPC-SL 的典型结构,这是 Boller 课题组报道的线宽 25 kHz 硅基 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 波导外腔窄线宽半导体激光器^[16],在 SPC 中集成了可调谐双微环谐振腔,可在 C 波段实现 46.8 nm 的宽波长范围调谐。

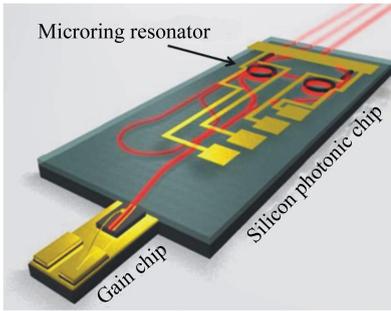


图1 硅基 Si_3N_4 波导外腔窄线宽半导体激光器典型结构^[15]

Fig.1 Typical structure of Si-based Si_3N_4 waveguide external cavity narrow linewidth semiconductor laser^[15]

2.2 工作原理

在前述的 SPC-SL 激光器基本结构中,集成 MRR 的 SPC 芯片用于实现激光波长选择和频率调谐。微环的结构和参数影响着激光器的线宽特

性和调谐特性^[17]。

波长的选择由激光纵模与 MRR 谐振谱相互重叠的共振峰相匹配的纵模决定。外腔采用自由光谱范围不同的 MRR,利用其游标效应进行波长选择,透射率在纵模与共振峰的最大重叠处达最大值,此处即为激射波长^[18]。

波长的调谐主要利用游标效应和波导材料的热光效应来实现。热光效应即材料的有效折射率随着温度的改变而改变,折射率的改变而引起光场的变化^[19]。因此,可通过在微环上放置热电极来改变材料的温度,并控制热电极的电流来改变波导折射率,使 MRR 透射光谱与纵模发生偏移,进行波长调谐。但由于热光调谐的热积累和消散需要一定的时间,所以高速调制仍是需要解决的问题。图2(a)给出了集成 MRR 和环形镜(LR)的 SPC 外腔结构,图2(b)和2(c)表示波长选择和波长调谐原理,其波长调谐范围 $\Delta\lambda$ 与 MRR 的自由光谱范围相关,可用公式(1)表示为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \left| \frac{FSR_{\text{ring1}} \cdot FSR_{\text{ring2}}}{FSR_{\text{ring1}} + FSR_{\text{ring2}}} \right|, \quad (1)$$

其中, c 为真空中的光速, λ 为波长, FSR_{ring1} 和 FSR_{ring2} 分别为两 MRR 的自由光谱范围,由公式(2)给出:

$$FSR_{\text{ring}} = \frac{c}{L_{\text{ring}} \cdot n_g}, \quad (2)$$

其中, L_{ring} 为 MRR 的周长, n_g 为波导的群折射率。通过改变折射率的方式可控制波长调谐范围。

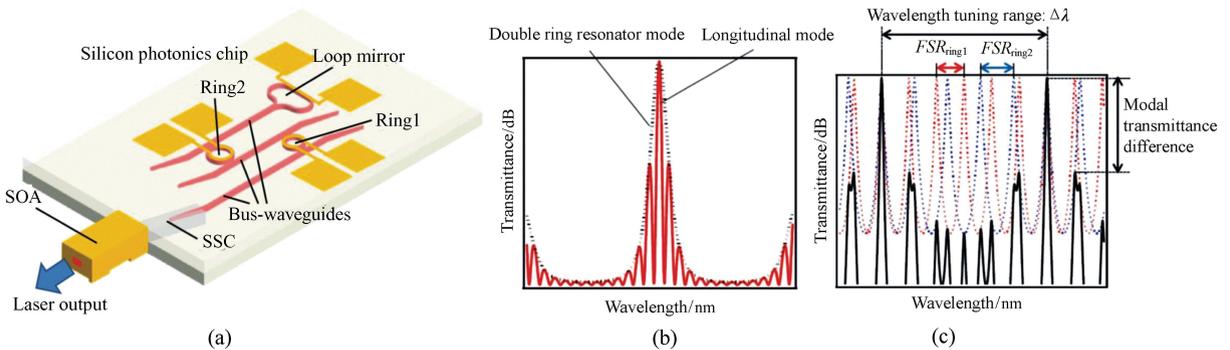


图2 (a)激光器集成 MRR 和 LR 的外腔结构(b)波长选择示意图;(c)波长调谐示意图^[20]

Fig.2 (a) External cavity structure of laser integrated MRR and LR ; (b) wavelength selection ; (c) wavelength tuning^[20]

3 SPC-SL 研究进展

研究人员基于准单片集成式结构提出了不同的设计方案,主要有集成 MRR 的 SPC 外腔和集成 MRR、LR 及马赫-曾德干涉仪(MZI)的 SPC 外腔等。此外,为增加耦合效率、改善光谱质量,在对准精度的提升、耦合损耗的降低及耦合处的反射率等方面也做了大量尝试。

3.1 集成 MRR 的 SPC 外腔

集成 MRR 的 SPC 外腔半导体激光器集中于双 MRR 结构,这种结构同时具备线宽窄、宽调谐、低功耗的特性。其中,光谱宽调谐的实现方式主要包括热调谐和电调谐。

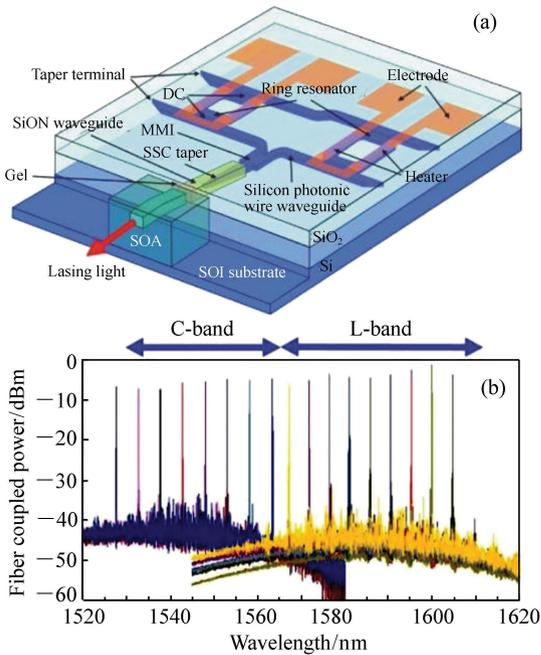


图 3 (a) 硅光子线波导外腔半导体激光器结构示意图; (b) 激光器波长调谐示意图^[21]

Fig. 3 (a) Schematic of the silicon base waveguide external cavity semiconductor laser; (b) schematic of laser wavelength tuning^[21]

2009 年,日本 NEC 公司的 Chu 等人^[21]报道了一种紧凑型、低功耗波长可调谐激光器,它由 SOA 与外腔绝缘衬底上的硅(SOI)波导 MRR 耦合集成,结构如图 3 所示。这种设计在尺寸和波长调谐范围等方面都有大幅改善。该激光器尺寸是

SiON 波导外腔可调谐激光器的 1/25。而基于热光效应硅谐振腔可实现 C 波段或 L 波段的调谐,激光波长最大调谐范围达 38 nm,调谐功耗为 26 mW。

2011 年,日本东北大学的 Suzuki 等人^[22]在 Chu 等人的研究基础上,提出了用于光互连网络的结构紧凑、低功耗、窄线宽激光器,并深入研究了波长可调激光器与滤波器光谱特性的关系。图 4(a)表示采用 SOI 波导双环谐振器和作为光增益的 SOA 混合集成结构的波长可调谐激光器,获得超过 45 nm 的光谱调谐范围和 225 kHz 的窄线宽,如图 4(b)所示。图 4(c)和 4(d)分别表示腔长和输出功率对激光线宽影响的理论计算和实测结果。

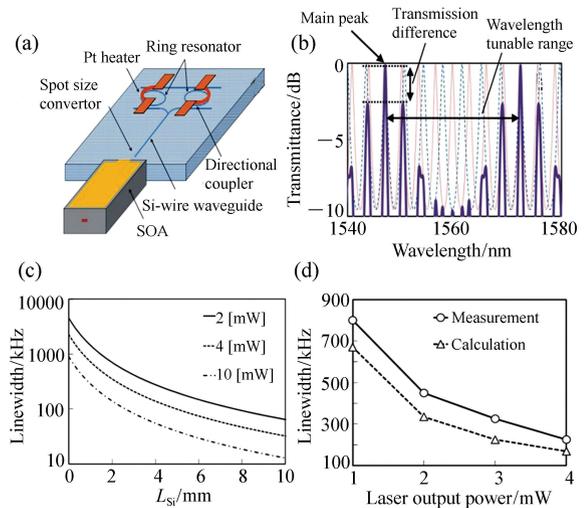


图 4 (a) 波长可调谐激光器的结构示意图; (b) 双环谐振器的波长调谐规律; (c) 不同输出功率下线宽与腔长的关系; (d) 输出功率对线宽大小的影响^[22]

Fig. 4 (a) Schematic structure of wavelength tunable laser; (b) wavelength tuning rules of double ring resonator; (c) relationship between linewidth and cavity length under different output powers; (d) effect of the output power on the linewidth^[22]

2013 年,新加坡南洋理工大学的 Ren 等人^[23]提出一种基于双环谐振器的具有环形回路外腔谐振的可调谐激光器。外腔由锥形波导、光分路器、双 MRR 及 U 形波导组成,如图 5(a)所

示。激光器的输出功率稳定在 -3 dBm, 边模抑制比(SMSR) > 40 dB, 线宽 < 100 kHz。图 5(b) 表示不同增益差条件下激光器 SMSR 和线宽与外

腔长度的关系。这项工作同时研究了调谐灵活性, 表明可通过两个加热器协作实现准连续波长调谐。

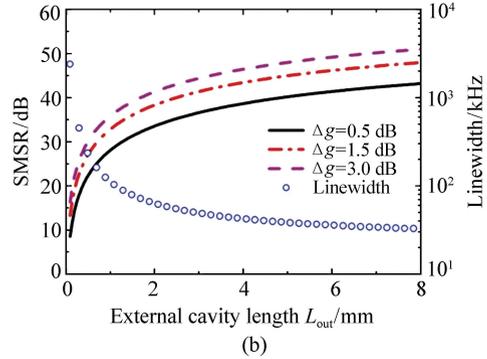
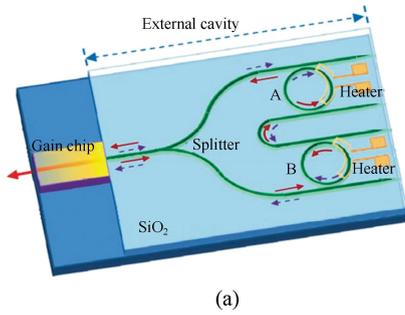


图 5 (a)激光器示意图及其外腔等效方案;(b)不同增益差条件下腔长对 SMSR 和线宽的影响^[23]

Fig. 5 (a) Schematic of laser and its external cavity equivalent scheme ; (b) influence of cavity length on SMSR and line-width under different gain differences^[23]

2013 年, 荷兰特温特大学 Oldenbeuving 等人^[16]报道了一种基于波导外腔的准单片集成激光器, 他利用可调谐双 MRR 作为波导外腔, 采用 InP 和 Si₃N₄ 的混合集成实现了低损耗集成光学波导回路, 如图 6(a) 所示。该激光器具有高速调

制特性, 通过加热 MRR 使之在预设波长间高速切换, 并可在全 C 波段调谐, 图 6(b) 给出了该激光器的自外差拍频光谱, 其洛伦兹拟合的 3 dB 带宽为 50 kHz, 这对应于激光线宽 25 kHz。

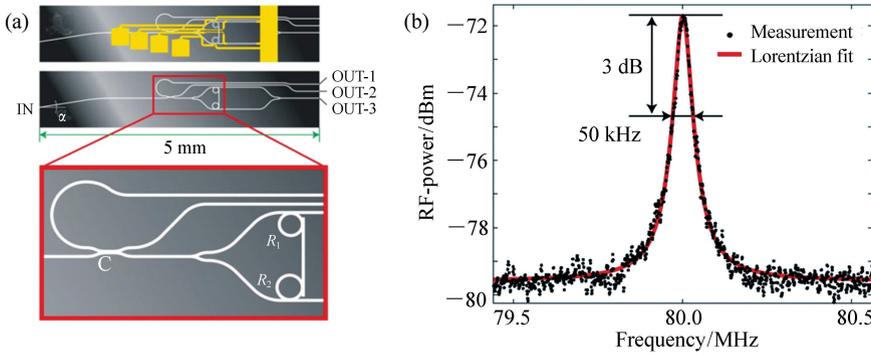


图 6 (a)波导芯片的示意图;(b)激光器自外差拍频光谱^[16]

Fig. 6 (a) Schematic of the waveguide chip ; (b) laser heterodyne beat spectrum^[16]

2016 年, 华为公司的 Zhao 等人^[24]报道了一种宽调谐混合 InP/Si₃N₄ 外腔激光器, 其外腔谐振器由低损耗、高品质因数的 Si₃N₄/SiO₂ 波导 MRR 构成。该激光器结构如图 7(a) 所示, 包括高功率 InP/InGaAsP 增益芯片和双 MRR, 其中 MRR 包含相位和功率调谐部分, 分别用于微调纵模和输出功率。图 7(b) 和 7(c) 分别表示激光器调谐时的自外差拍频射频频拍频光谱和叠加光谱。

该激光器可得到 50 nm 的波长调谐范围和 65 kHz 的线宽。

2016 年, 荷兰特温特大学的 Fan 等人^[25]在前期研究基础上, 报道了一种由双环 MRR 作为反馈外腔的集成的 InP-Si₃N₄ 混合激光器, 通过提高对准精度并用增大反射式 SOA 长度且增大驱动电流的方式减小线宽, 其光谱调谐范围超过 43 nm, SMSR 为 35 dB, 线宽可达 90 kHz, 相对强度

噪声小于 -135 dBc/Hz。2017 年,该课题组报道的集成 MRR 结构的 InP-Si₃N₄ 混合集成激光器获

得了 290 Hz 窄线宽^[26]。

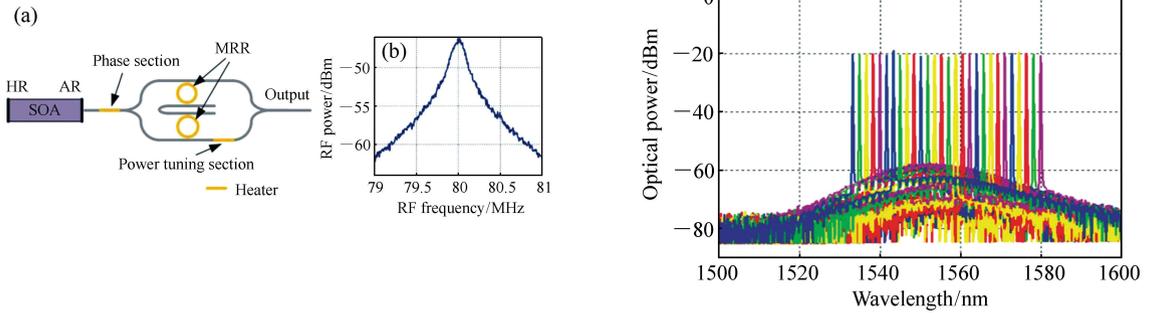


图 7 (a) MRR 外腔激光器的示意图; (b) 自延迟外差 RF 拍频光谱; (c) 叠加光谱^[24]

Fig. 7 (a) Schematic of MRR external cavity laser; (b) self-delayed heterodyne RF beat spectra; (c) superimposed laser spectra^[24]

2017 年,华中科技大学 Hu^[27] 等人报道了高功率、高 SMSR 的宽调谐硅基激光器,这种结构采用带有隔离槽的 MRR,有效控制了温度对波长的影响,线宽可达 130 kHz。

激光器的主要优势。

3.2 集成 MRR 和 LR 的 SPC 外腔

2010 年, Matsumoto 等人^[28] 设计了由三环谐振器、Air-Bridge 结构和 LR 组成的可调谐激光器,如图 8 所示。该激光器可获得稳定的单模激光输出,C 波段光谱线宽小于 100 kHz,输出功率高达 16 dBm, SMSR 超过 45 dB,调谐范围可达到 60 nm。3 个环分别用于波长锁定、决定调谐波长范围和波长微调,图 8(b) 表示在 C 波段范围内测得的光谱线宽分布。

集成 MRR 和 LR 的 SPC 外腔结构的优势在于 LR 增加了外腔的有效长度。使得外腔的物理长度小于有效长度,在不增加波导尺寸的情况下可获得更窄的线宽,是这种结构相较于传统 DBR

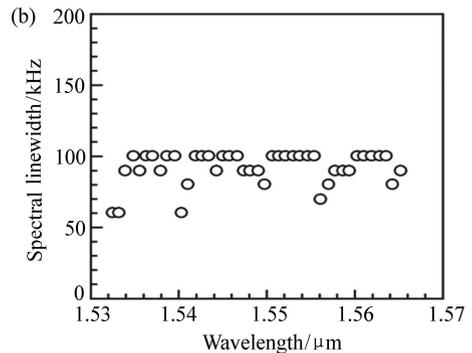
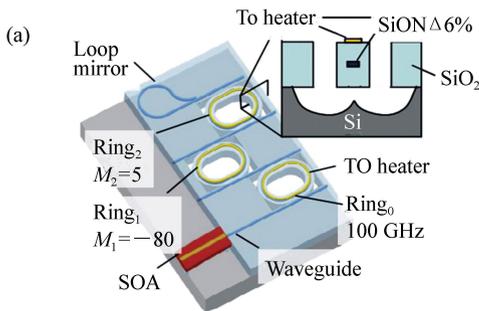


图 8 (a) 基于 MRR 和 air-bridge 结构的可调谐激光器结构示意图; (b) C 波段的波长范围内测得的光谱线宽^[27]

Fig. 8 (a) Schematic structure of tunable laser based on waveguide microring resonators with air-bridge structure; (b) measured spectral linewidth within C band wavelength range^[27]

2012 年, Nemoto 等人^[29] 设计的激光器外腔由两个自由光谱范围不同的 MRR 和提供光学反馈的 LR 组成,如图 9(a) 所示。它可实现 44 nm 的波长调谐,整个 L 带上光谱线宽小于 70 kHz。

图 9(b) 显示了腔长对激光线宽和品质因数 Q 的影响,可以看出腔长越长线宽越窄,品质因数 Q 越高,反映了 LR 长腔的巨大优势。

2013 年,日本东京大学的 Kita 等人^[30] 提出

的激光器采用与 Nemoto 报道的同样 SPC 芯片结构,可以获得 25.1 mW 的最大激光输出功率,大于 50 nm 的连续波长调谐,小于 100 kHz 的光谱线宽。进一步优化后^[31],获得 51.5 nm 的调谐范

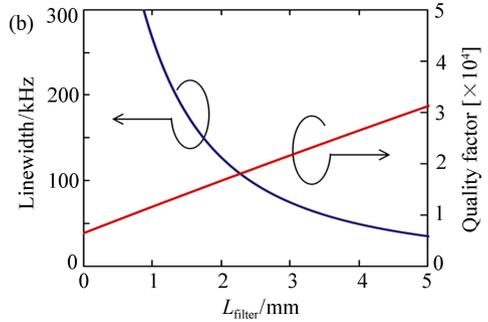
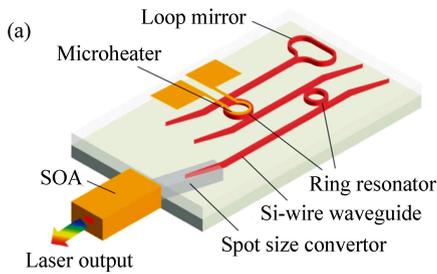


图 9 (a)激光器的结构;(b)有效腔长与线宽和品质因数 Q 的关系^[29]

Fig. 9 (a) Laser structure; (b) relationship between L_{filter} and the linewidth and the quality factor Q ^[29]

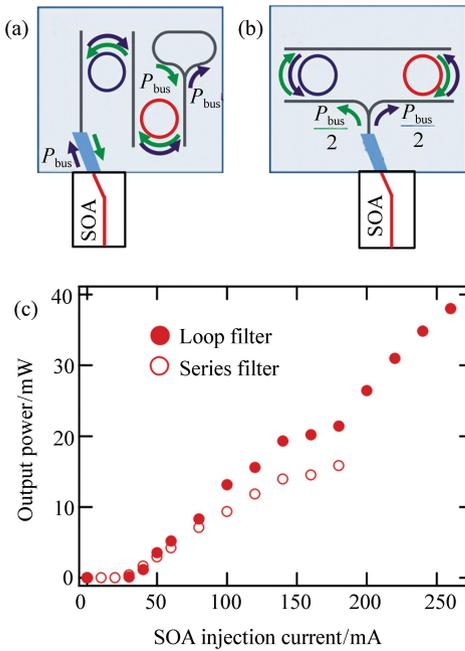


图 10 (a)改进前滤波器配置示意图;(b)改进后滤波器配置示意图;(c)对比改进前后的输出功率大小^[20]

Fig. 10 (a) Filter configuration without improvement; (b) improved filter configuration; (c) comparison of output powers before and after improvement^[20]

围和 64.8 kHz 的线宽。通过比较腔长对线宽的影响,进一步证实窄线宽可调谐激光器设计中长外腔的优势。

60 kHz 的激光线宽,调谐范围达 55 nm。结构改进后光波发生分支,与 MRR 耦合的光功率减半,双光子吸收影响减至四分之一,获得 38.5 mW 的高输出功率,如图 10 所示。

2015 年, NEC 公司的 Kobayashi 等人^[32-33]利用硅基波导 MRR 和 LR 作为光学外腔,设计的激光器结构如图 11 所示。通过优化低损耗的包层分布,改进波导制备工艺,并且采用无源对准技术封装 SOA,使激光器保持稳定的高输出功率。在整个 C 波段获得超过 100 mW (20 dBm) 的光纤耦合输出功率以及小于 15 kHz 的线宽。

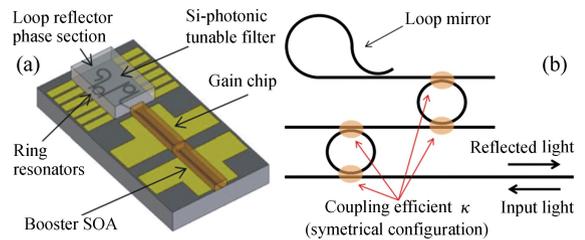


图 11 (a)激光器示意图;(b)滤波器设计方案^[32]

Fig. 11 (a) Schematic of the tunable laser; (b) filter design scheme^[32]

3.3 集成 MRR 和 MZI 的 SPC 外腔

由于 MZI 使透射率在最近邻波长处最小,在波导回路中波长选择性更高,所以在集成 MRR 的 SPC 中引入 MZI 结构可以使激光器获得更窄的线宽和更大波长调谐范围,且线宽大小与 MZI

2016 年, Kita 等人^[20]进一步优化外腔的结构设计,降低硅材料的非线性影响,获得了小于

的对称性有关。

2014 年, 贝尔实验室的 Debregeas 等人^[34] 提出将 SOA 与硅基环形谐振滤波器和 MZI 的外腔混合集成的可调谐激光器, 获得了 2 kHz 的线宽和 35 nm 的可调谐范围。波导内部集成了 FSR 为 25 GHz 的参考微环和一个含 MZI 的微环, 可通过控制波导上的加热器, 局部改变任意波导段的相位, 以实现波长的粗调和细调。

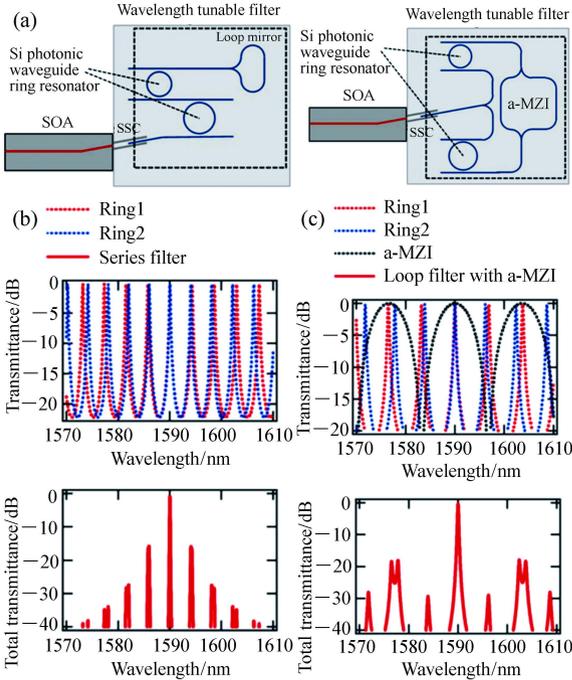


图 12 (a) 激光器结构(左)不含 MZI 的波导结构(右)含 MZI 的波导结构; (b) 不含 MZI 的结构中(上)两个环形谐振器透射率及(下)波导总透射率; (c) 含 MZI 的结构中(上) MZI 与两环形谐振器透射率(下)波导总透射率^[35]

Fig. 12 (a) Schematic structure of laser (left) waveguide structure without MZI and (right) waveguide structure with MZI; (b) in structure without MZI (up) the transmittance of two ring resonators and (down) the total transmittance; (c) in structure with MZI (up) the transmittance of MZI and two ring resonators and (down) the total transmittance^[35]

2014 年, Kita 等人^[35] 将 MZI 和 MRR 相串联, 设计了如图 12(a) 所示的准单片集成结构半

导体激光器, 图 12(b) 和 12(c) 分别给出了是否含 MZI 结构的透射谱。通过设计 MZI, 使其 FSR 与 MRR 的 FSR 相差两倍, 使 MZI 透射率在两个 MRR 共振波长处最大, 此时, 重叠光谱中最近邻共振波长处的透射率将大幅降低。最终实现环形谐振器的透射光谱中边模的有效抑制, 并大大提高了波长选择性。该激光器的线宽最窄可达 19 kHz, 波长调谐范围达 61.7 nm。2015 年, Kita 等人在随后的研究中实现了高达 99 nm 的宽调谐范围, 还比较了 MZI 的使用对调谐范围的影响^[36]。

2015 年, Tang 等人^[37] 报道的含有高非对称 MZI 的准单片集成激光器获得了 12 kHz 的窄线宽, 如图 13 所示。图 13(b) 结果给出了强、弱非对称 MZI 结构对激光线宽的影响情况, 证实了增加 MZI 两臂间的不对称性, 可以获得 MRR 更大的模间增益差和更窄的线宽。

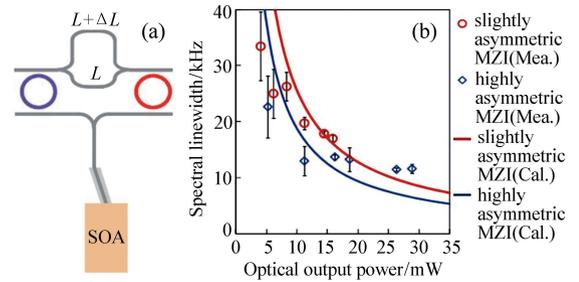


图 13 (a) 具有高度非对称 MZI 的窄线宽可调谐激光器; (b) 光谱线宽的计算值和实测值^[37]

Fig. 13 (a) Narrow-spectral-linewidth wavelength-tunable laser with highly asymmetric Mach-Zehnder interferometer; (b) calculated and measured values for spectral linewidths^[37]

4 SPC-SL 研究存在的技术难题

在 SPC-SL 激光器结构中, 外腔和增益芯片的耦合质量是制约激光器光谱特性进一步提升的关键, 研究人员通过研究不同因素对耦合效率和光谱质量的影响, 并针对研究中存在的技术难题提出了一些解决措施和改进思路。

4.1 增加耦合效率

半导体增益芯片或 SOA 与 SPC 之间的耦合效率是制约激光特性的关键因素, 尤其是输出功率, 而输出功率的增加可以显著降低线宽。2016

年, Fan 等人^[23]探讨了耦合效率对输出功率的影响,并进一步提出激光器的改进方案。由于线宽随功率增加而减小^[22],可以在改善散热的基础上,通过提高对准精度来提高芯片间的模式匹配程度,在输出功率相同的情况下获得更窄的线宽。

降低耦合损耗也是增加耦合效率的有效手段之一。2005年, Tsuchizawa 等人^[38]提出低损耗、低反射的模场转换器结构,即模斑变换器(SSC)。SOA与硅基波导相连接,在扩大光场模式的同时将反射和耦合损耗最小化,有利于解决有效折射率和芯径尺寸差异、模场之间的不匹配引起的损耗,提高模场匹配程度,从而实现高效耦合^[39]。如图14所示,这种结构通过波导宽度、厚度以及折射率的逐渐变化,实现波导间的模场转换,广泛应用于芯片间的耦合^[21-27,32,34-36,40-42]。美国康奈尔大学的 Griffith^[43]等人提出利用新型热氧化工艺和外加反向偏置电压的方法有效降低了由工艺带来的线性损耗,获得了线宽100 kHz的激光光源。

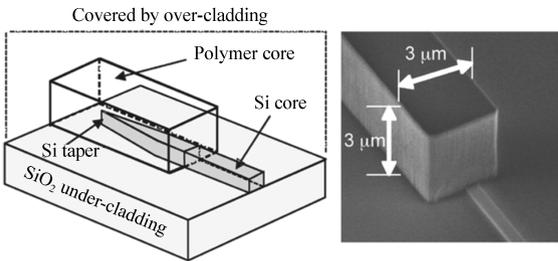


图14 模斑转换器示意图^[38]

Fig. 14 Schematic of the SSC^[38]

键合技术和倒装技术等低连接损耗对接方法的应用,也是提升其耦合效率的有效方法。2006年, Watanabe^[44]和 Takeuchi^[45]等人利用无源对准技术将耦合损耗降至0.41 dB,线宽达0.5 MHz。2012年, Tanaka 等人^[46]设计的Si/III-V混合集成激光器如图15所示,在Si和SOA界面上采用高精度倒装键合和适当的SSC结构。图15(d)的模拟结果表明:通过减少耦合损耗,阈值电流、斜率效率和输出功率都得到改善。这是由于耦合损耗会影响腔损耗和波导输出的外量子效率。为了实现倒装芯片键合的低损耗光耦合,界面处的模场匹配和波导的精确对准至关重要。由图15(a)~

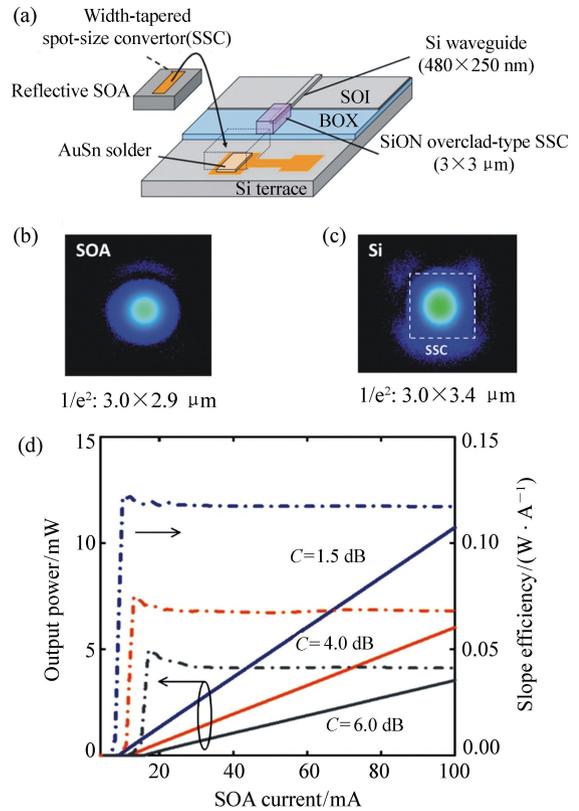


图15 (a) Si-SOA 界面结构示意图; (b) SOA 的近场图样; (c) Si 波导的近场图样; (d) 模拟不同耦合损耗 ($C = 1.5, 4.0, 6.0$ dB) 下的光功率-电流特性^[46]

Fig. 15 (a) Schematic of Si-SOA interface structure; (b) near field pattern (NFP) at SOA facet, (c) NFP at Si facet; (d) simulated Light-power-Current characteristics for different coupling losses ($C = 1.5, 4.0, 6.0$ dB)^[46]

15(c)可见,在Si芯片的耦合边缘集成了一个由锥形Si波导组成的SSC和SiON外包覆波导,扩展了Si波导的模场,可实现Si波导和SOA之间有效光耦合,有利于获得良好的电流限制,从而可在Si-SOA界面处提供优异的模场匹配,实现Si-SOA界面处1.55 dB的低耦合损耗。采用这种结构,激光器实现了高于10 mW的输出功率, SMSR高于40 dB且RIN低于-130 dB/Hz。

4.2 降低反射率

耦合处反射率的降低也可以显著改善激光特性,例如线宽、相频噪声等。Fujioka 等人^[47]通过在SOA和硅基波导谐振器的对接端面使用抗

反射涂层 (AR) 或者波导模式有效折射率匹配来减小反射, 并通过调整匹配到模式的光斑尺寸来减小耦合损耗。图 16 是对 SSC 损耗测量结果, 可以看出不同芯层宽度的损耗情况。在图 17 (a) 与

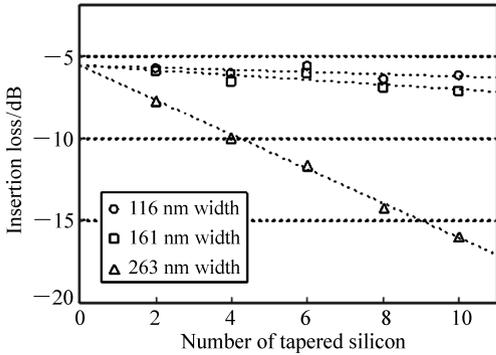


图 16 对硅芯层高度为 167 nm 的模斑转换器的损耗测量结果^[47]

Fig. 16 Loss measurement results of SSC for silicon core height of 167 nm^[47]

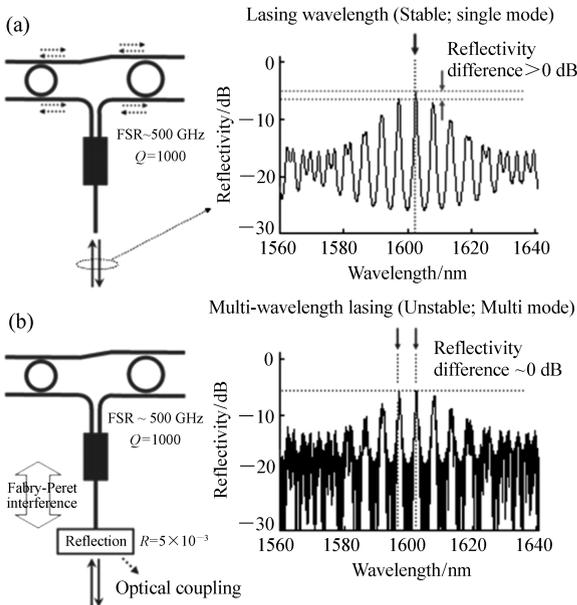


图 17 (a) 不含反射的光耦合的典型反射光谱; (b) 含反射的光耦合的典型反射光谱^[47]

Fig. 17 Typical reflectance spectra of optical coupling (a) without reflection (b) with reflection^[47]

17 (b) 比较了反射率对硅波导环形反射器的反射光谱的影响。光耦合处的反射形成的 F-P 干涉使图 (b) 中出现细小条纹, 降低激光器的稳定性。可以看出, 环形反射器的主峰和边峰之间的反射率差较大, 说明降低反射率是提升光谱质量的有效途径。

5 结束语

窄线宽半导体激光器是高速光通信、相干空间激光通信和相干光学探测等领域的核心光源, 在众多研究方案中, 基于硅光子集成技术的 SPC-SL 是其研究热点^[52]。从前述研究进展来看, 国外众多机构对 SPC-SL 结构的激光器开展了研究, 并取得了突破性成果。国内对该类型激光器的研究起步较晚, 华中科技大学^[27, 48-49]、中科院半导体所^[50]、浙江大学^[51]等单位也开展了相关的研究, 并取得了一定的成果, 但激光器性能距离国际水平仍存在显著差距。

本文系统总结和分析了集成 MRR、LR 和 MZI 等波导结构的 SPC 在激光线宽窄化、波长调谐等方面的研究进展。并深入讨论了 SPC 外腔与半导体增益芯片之间实现高效耦合的技术难点, 以及现阶段的解决措施。

针对目前的研究现状, 提出几点展望: 首先是研究提高窄线宽半导体激光器的输出功率, 例如在空间信号传输及传感等实际应用中, 一般都对输出功率要求较高, 而且输出功率也会影响线宽大小, SPC-SL 输出功率的提高是研究人员需要面对的新难题。其次是研究损耗更小的 SPC 和效率更高的耦合方式, 需要优化器件结构和工艺, 改进增益芯片和波导的模斑, 提高波导侧壁平整度和垂直度, 采用高精度对准设备使增益芯片的光斑和波导光斑更好地匹配。最后为实现光互连, 半导体激光器需要与其它光器件实现光子集成, 研究人员还需进一步调整参数、优化工艺, 提升激光器的性能和工艺兼容性。

参考文献:

[1] HUY 丹丹, CARROLL J, SMYTH F, *et al.*. Low linewidth lasers for enabling high capacity optical communication

- systems[C]. Proceedings of the 14th International Conference on Transparent Optical Networks IEEE ,2012:1-3.
- [2] MATSUI Y,ERIKSSON U,WESSTROM J O,*et al.*. Narrow linewidth tunable semiconductor laser [C]. Proceedings of 2016 Compound Semiconductor Week (CSW) [Includes 28th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials(IPRM) & 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS) ,IEEE,2016:1-2.
- [3] 曾飞,高世杰,伞晓刚,等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学,2016,9(1):65-73.
ZENG F,GAO SH J,SAN X G,*et al.*. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. *Chinese Optics*,2016,9(1):65-73. (in Chinese)
- [4] WICHT A,BAWAMIA A,KRÜGER M,*et al.*. Narrow linewidth diode laser modules for quantum optical sensor applications in the field and in space[J]. *Proceedings of SPIE*,2017,10085:100850F.
- [5] 张海洋,赵长明,蒋奇君,等. 基于相干激光雷达的激光微多普勒探测[J]. 中国激光,2008,35(12):1981-1985.
ZHANG H Y,ZHAO CH M,JIANG Q J,*et al.*. Laser detection on micro-doppler effect in coherent lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2008,35(12):1981-1985. (in Chinese)
- [6] 王直圆,陈超,单肖楠,等. 光纤光栅外腔半导体激光器噪声特性仿真[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(1):011401.
WANG ZH Y,CHEN CH,SHAN X N,*et al.*. Simulation of noise characteristics of fiber grating external cavity lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2017,54(1):011401. (in Chinese)
- [7] AOYAMA K,YOSHIOKA R,YOKOTA N,*et al.*. Experimental demonstration of linewidth reduction of laser diode by compact coherent optical negative feedback system [J]. *Applied Physics Express*,2014,7(12):122701.
- [8] IP E,KAHN J M,ANTHON D,*et al.*. Linewidth measurements of MEMS-based tunable lasers for phase-locking applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2005,17(10):2029-2031.
- [9] OKAI M,SUZUKI M,TANIWATARI T. Strained multiquantum-well corrugation-pitch-modulated distributed feedback laser with ultranarrow (3.6 kHz) spectral linewidth[J]. *Electronics Letters*,1993,29(19):1696-1697.
- [10] 佟存柱,汪丽杰,田思聪,等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究[J]. 中国光学,2015,8(3):480-498.
TONG C ZH,WANG L J,TIAN S C,*et al.*. Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chinese Optics*,2015,8(3):480-498. (in Chinese)
- [11] LIANG W,ILCHENKO V S,ELIYAHU D,*et al.*. Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser [J]. *Nature Communications*,2015,6:7371.
- [12] ZHANG L,WEI F,SUN G W,*et al.*. Thermal tunable compact external cavity laser with thermal sensitivity enhanced FBG[C]. Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference ,OSA,2016:AF1F.7.
- [13] NUMATA K,ALALUSI M,STOLPNER L,*et al.*. Characteristics of the single-longitudinal-mode planar-waveguide external cavity diode laser at 1064 nm[J]. *Optics Letters*,2014,39(7):2101-2104.
- [14] REDDY U,DIAS N L,GARG A,*et al.*. A single spectral mode wide stripe laser with very narrow linewidth [J]. *Applied Physics Letters*,2011,99(17):171109.
- [15] FAN Y W,OLDENBEUVING R M,KLEIN E J,*et al.*. A hybrid semiconductor-glass waveguide laser [J]. *Proceedings of SPIE*,2014:1051-1067.
- [16] 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.
- [17] 王晓倩,马可贞,赵宇,等. SOI 多环级联光学谐振腔滤波器[J]. 发光学报,2013,34(5):645-649.
WANG X Q,MA K ZH,ZHAO Y,*et al.*. SOI multi-ring cascade optic resonator filters [J]. *Chinese Journal of Luminescence*,2013,34(5):645-649. (in Chinese)
- [18] 潘碧玮,余力强,陆丹,等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器[J]. 中国激光,2015,42(5):41-45.
PAN B W,YU L Q,LU D,*et al.*. 20 kHz narrow linewidth fiber bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2015,42(5):41-45. (in Chinese)
- [19] 周吉,贺志宏,于孝军,等. 硅基半导体多场耦合下的光传输及电调控特性分析[J]. 发光学报,2016,37(1):63-73.
ZHOU J,HE ZH H,YU X J,*et al.*. Optical transmission and electrical modulation for silicone semiconductor with multi-field effect [J]. *Chinese Journal of Luminescence*,2016,37(1):63-73. (in Chinese)
- [20] KITA I,TANG R,YAMADA H. Narrow spectral linewidth silicon photonic wavelength tunable laser diode for digital co-

- herent communication system [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6):1500612.
- [21] CHU T, FUJIOKA N, ISHIZAKA M. Compact, lower-power-consumption wavelength tunable laser fabricated with silicon photonic wire waveguide micro-ring resonators [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16):14063-14068.
- [22] SUZUKI K, KITA T, YAMADA H. Wavelength tunable laser diodes with Si-wire waveguide ring resonator wavelength filters [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7943:79431 G.
- [23] REN M, CAI H, TAO J F, *et al.*. A tunable laser using loop-back external cavity based on double ring resonators [C]. Proceedings of 2013 Transducers & Eurosensors Xxvii: the 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, IEEE, 2013:1424-1427.
- [24] ZHAO J L, OLDENBEUVING R M, EPPING J P, *et al.*. Narrow-linewidth widely tunable hybrid external cavity laser using Si₃N₄/SiO₂ microring resonators [C]. Proceedings of 2016 IEEE, International Conference on Group IV Photonics, IEEE, 2016:24-25.
- [25] FAN Y W, EPPING J P, OLDENBEUVING R M, *et al.*. Optically integrated InP-Si₃N₄ hybrid laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6):1505111.
- [26] FAN Y W, OLDENBEUVING R M, ROELOFFZEN C G, *et al.*. 290 Hz intrinsic linewidth from an integrated optical chip-based widely tunable InP-Si₃N₄ hybrid laser [C]. Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA, 2017:JTh5C.9.
- [27] HU Y, CAO W, TANG X SH, *et al.*. High power, high SMSR and wide tuning range silicon micro-ring tunable laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7):8029-8035.
- [28] MATSUMOTO T, SUZUKI A, TAKAHASHI M, *et al.*. Narrow spectral linewidth full band tunable laser based on waveguide ring resonators with low power consumption [C]. Proceedings of 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, IEEE, 2010:1-3.
- [29] NEMOTO K, KITA T, YAMADA H. Narrow-spectral-linewidth wavelength-tunable laser diode with Si wire waveguide ring resonators [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(8):082701.
- [30] KITA T, NEMOTO K, YAMADA H. Narrow spectral linewidth and high output power Si photonic wavelength tunable laser diode [C]. Proceedings of the 10th, International Conference on Group IV Photonics, IEEE, 2013:152-153.
- [31] KITA T, NEMOTO K, YAMADA H. Long external cavity Si photonic wavelength tunable laser diode [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(4S):04EG04.
- [32] 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.
- [33] SATO K, KOBAYASHI N, NAMIWAKA M, *et al.*. Demonstration of silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers [C]. Proceedings of 2015 European Conference on Optical Communication, IEEE, 2015:1-3.
- [34] DEBREGEAS H, FERRARI C, CAPPUZZO M A, *et al.*. 2 kHz linewidth c-band tunable laser by hybrid integration of reflective SOA and SiO₂ PLC external cavity [C]. Proceedings of 2014 International Semiconductor Laser Conference, IEEE, 2014:50-51.
- [35] KITA T, NEMOTO K, YAMADA H. Silicon photonic wavelength-tunable laser diode with asymmetric Mach Zehnder interferometer [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4):8201806.
- [36] 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.
- [37] TANG R, KITA T, YAMADA H. Narrow-spectral-linewidth silicon photonic wavelength-tunable laser with highly asymmetric Mach Zehnder interferometer [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7):1504-1507.
- [38] TSUCHIZAWA T, YAMADA K, FUKUDA H, *et al.*. Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(1):232-240.
- [39] 高峰, 秦莉, 陈泳屹, 等. 弯曲波导研究进展及其应用 [J]. *中国光学*, 2017, 10(2):176-193.
GAO F, QIN L, CHEN Y Y, *et al.*. Research progress of bent waveguide and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2):176-193. (in Chinese)
- [40] QIU Y, XIAO X, LUO M, *et al.*. Tunable, narrow line-width silicon micro-ring laser source for coherent optical communications [C]. Proceedings of 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2015:1-2.

- [41] TOKUSHIMA M, KAWASHIMA H, HORIKAWA T, *et al.*. Post-integrated dual-core large-end spot-size converter with Si vertical taper for filter bull-coupling to Si-photonics chip [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 4783-4791.
- [42] LEE J H, BOVINGTON J, SHUBIN I, *et al.*. Demonstration of 12.2% wall plug efficiency in uncooled single mode external-cavity tunable Si/III-V hybrid laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9):12079-12088.
- [43] GRIFFITH A G, LAU R K W, CARDENAS J, *et al.*. Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation [J]. *Nature communications*, 2015, 6: 6299.
- [44] WATANABE S, TAKAHASHI M, SUZUKI K, *et al.*. High power tunable resonated-ring-reflector laser using passive alignment technology [C]. Proceedings of 2016 European Conference on Optical Communications, IEEE, 2006:1-2.
- [45] TAKEUCHI T, TAKAHASHI M, SUZUKI K, *et al.*. Wavelength tunable laser with silica-waveguide ring resonators [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2009, E92-C(2):198-204.
- [46] TANAKA S, JEONG S H, SEKIGUCHI S, *et al.*. High-output-power, single-wavelength silicon hybrid laser using precise flip-chip bonding technology [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27):28057-28069.
- [47] FUJIOKA N, CHU T, ISHIZAKA M. Compact and low power consumption hybrid integrated wavelength tunable laser module using silicon waveguide resonators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(21):3115-3120.
- [48] LI J, SUN J Q, SHEN X. Theoretical and numerical models of tunable semiconductor ring laser using monolithically integrated microring reflector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(2):315-320.
- [49] HUANG ZH, WANG Y. Selectable heterogeneous integrated III-V/SOI single mode laser based on vernier effect [C]. Proceedings of 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, OSA, 2013: TuPM_3.
- [50] LI SH, WU Y D, YIN X J, *et al.*. Tunable filters based on an SOI nano-wire waveguide micro ring resonator [J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32(8):084007.
- [51] 李霞, 王超, 余辉, 等. 基于微环谐振腔的可调谐硅基反射腔镜 [J]. *光学学报*, 2016, 36(12):1223002.
LI X, WANG CH, YU H, *et al.*. Tunable silicon reflection cavity mirror based on microring resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12):1223002. (in Chinese)
- [52] KASPER E. 基于锗硅芯片的光电子学前景与挑战 [J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(2):1-6.
KASPER E. Prospects and challenges of Si/Ge on-chip optoelectronic cells [J]. *Optics & Optoelectronics Technology*, 2010, 8(2):1-6. (in Chinese)

作者简介:



杜悦宁(1993—),女,甘肃兰州人,硕士研究生,2015年于华中科技大学获得学士学位,主要从事窄线宽半导体激光器方面的研究。E-mail:dynhzh@163.com



陈超(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士,助理研究员,2014年于吉林大学获得博士学位,主要从事窄线宽半导体激光器和微纳光子器件方面的研究。E-mail:chenc@ciomp.ac.cn



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,博士,研究员,博士生导师,1999年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体激光技术及应用方面的研究。E-mail:qinl@ciomp.ac.cn