

文章编号: 1000-7032(2025)12-2353-09

基于一维光子晶体纳米束的外腔激光器光电设计

胡清波¹, 杨一粟^{1*}, 童彬彬¹, 熊伟宏¹, 严英占^{2,3}, 朱刚毅^{4,5}, 杨大全^{1*}

(1. 北京邮电大学 信息光子学与光通信全国重点实验室, 北京 100876;

2. 中国电子科技集团公司 信息科学研究院, 北京 100144;

3. 集成电路与微系统全国重点实验室, 北京 100042;

4. 南京邮电大学 集成电路科学与工程学院(产教融合学院), 江苏 南京 210003;

5. 南京邮电大学 镇江研究院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 提出了一种具有一维光子晶体纳米束腔的波导型外腔半导体激光器, 通过将反射式半导体光放大器与硅基纳米束腔进行对接耦合, 实现了混合集成激光器。纳米束腔具有高品质因子、小模式体积和紧凑的尺寸, 是构建窄线宽、可调谐外腔半导体激光器的核心无源器件。我们建立了针对纳米束腔的波导型外腔激光器综合仿真模型, 优化了模斑转换器以实现反射式半导体光放大器和硅基单模线波导的高效耦合, 并进一步讨论了模斑转换器插入损耗、外腔反射率对外腔激光器激光性能的影响。我们发现, 改变纳米束腔所处环境折射率可以实现激光波长的高效调谐, 调谐效率仿真值为 120 nm/RIU。所设计的外腔激光器的纳米束腔尺寸仅为 0.7 μm × 20 μm , 线宽仿真值为 30 kHz。

关键词: 外腔半导体激光器; 纳米束; 硅基光子学; 混合集成

中图分类号: TN248.4; TN256

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250169

CSTR: 32170.14.CJL.20250169

Optoelectronic Design of An External Cavity Laser Based on
One-dimensional Photonic Crystal NanobeamHU Qingbo¹, YANG Yisu^{1*}, TONG Binbin¹, XIONG Weihong¹, YAN Yingzhan^{2,3},ZHU Gangyi^{4,5}, YANG Daquan^{1*}

(1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Information Science Academy of China Electronics Technology Group Cooperation, Beijing 100144, China;

3. National Key Laboratory of Integrated Circuits and Microsystems, Beijing 100042, China;

4. College of Integrated Circuit Science and Engineering (College of Industry-Education Integration),

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

5. Zhenjiang NJUPT Research Institute, Zhenjiang 212000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: yangyisu@bupt.edu.cn; ydq@bupt.edu.cn

Abstract: A waveguide-based external cavity diode laser (ECDL) with one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity is proposed. In the design, the reflective semiconductor optical amplifier (RSOA) is hybrid integrated

收稿日期: 2025-06-12; 修订日期: 2025-07-02

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2023YFB2805600); 北京邮电大学大学生研究创新基金; 中央高校基本科研业务费专项资金(BUPT, 2024ZCJH14); 国家自然科学基金(12474372, 61904016); 北京市自然科学基金(Z210004); 北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室项目(IPOC2024ZR01); 北京市科技新星计划项目(20230484433); 信息光子学与光通信全国重点实验室(北京邮电大学)开放基金

Supported by National Key Research and Development Program of China (SQ2023YFB2805600); Research Innovation Fund for College Students of Beijing University of Posts and Telecommunications; the Fundamental Research Funds for the Central Universities (BUPT, 2024ZCJH14); National Natural Science Foundation of China (12474372, 61904016); Natural Science Foundation of Beijing Municipality (Z210004); State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications (IPOC2024ZR01); Beijing Nova Program from Beijing Municipal Science and Technology Commission (20230484433); Open Fund of State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications (Beijing University of Posts and Telecommunications)

with a silicon-based nanobeam cavity through butt-coupling method. The nanobeam cavity has a high quality factor, small mode volume and compact footprint. It is the critical passive device to build the narrow-linewidth tunable waveguide-based ECDL. We build a comprehensive simulation model to analyze the optoelectronic response of the waveguide-based ECDL with a nanobeam cavity. The spot size converter (SSC) is optimized to achieve highly efficient butt-coupling between the RSOA and the single-mode silicon channel waveguide. And the influences of the insertion loss of the SSC and the reflectivity of the nanobeam cavity on the performance of the ECDL are discussed. By changing the refractive index of the environment in which the nanobeam cavity is placed in the simulation, we can tune the wavelength of the ECDL efficiently at a sensitivity of 120 nm/RIU. The size of the nanobeam in the designed ECDL is only $0.7\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ and the simulated linewidth is 30 kHz.

Key words: external cavity diode laser (ECDL); nanobeam; silicon photonics; hybrid integration

1 引 言

半导体激光器得益于尺寸小、成本低、易于波长调谐的优势,在光通信、光传感、光计算^[1-5]等领域取得了广泛应用,但是半导体激光器的腔长往往受限于管芯尺寸,致使其输出激光的线宽和调谐范围受到了限制。为了解决上述问题,波导型外腔半导体激光器(External cavity diode laser, ECDL)得到了重视^[6]。它采用反射式半导体光放大器(Reflective semiconductor optical amplifier, RSOA)作为增益区,不仅提供了位于光通信C波段的宽带光学增益,而且是一种稳定可靠的光放大器件,广泛应用于光纤通信系统中。此外,波导型ECDL采用低损耗可调谐的硅基光子集成回路(Photonic integrated circuit, PIC)中的波导器件构成外腔,可实现几十纳米的波长调谐^[6-7]。随着硅基PIC的快速发展,采用硅基马赫-曾德尔干涉型外腔和硅基微环型外腔的波导型ECDL的性能不断提升^[7-10]。但是,波导型ECDL为了实现更大的波长调谐范围和更窄的线宽,往往需要更长的外腔,这就会引入更大的插入损耗并使激光器芯片尺寸难以进一步缩小^[11-12]。与上述微腔相比,光子晶体纳米束(nanobeam)腔具有更小的尺寸,适用于大规模片上集成^[13-15],因此有望使其改进波导型ECDL的性能。除了核心器件,ECDL中的RSOA和外腔的集成方法也对激光性能有着重要影响,其中一种是基于对接耦合的混合集成方案^[16-18],另一种是基于晶圆键合的异质集成方案。后者虽然有更高的集成度,但工艺步骤更加复杂^[19]。作为更具产业化前景的混合集成方案,其核心耦合器件为模斑转换器(Spot size converter, SSC),已经得到了广泛研究^[11,20-22]。

我们设计了一种具有 nanobeam 腔的硅基波导型 ECDL,能够在减少器件尺寸的同时实现宽带调谐。该激光器采用混合集成方案,为了探明 SSC 性能对激光器光电性能的影响,我们建立了集成有 RSOA、SSC 以及 nanobeam 腔的波导型 ECDL 数值仿真分析模型。通过改变外腔所处环境折射率的方式进行调谐,调谐效率达到 120 nm/RIU,线宽维持在 30 kHz。该激光器在集成光学传感系统中有着广阔的应用前景。

2 基于 nanobeam 腔的 ECDL 理论模型

基于 nanobeam 腔与 RSOA 的波导型 ECDL 结构如图 1(a)所示,采用等效反射面模型对其进行分析^[23]。

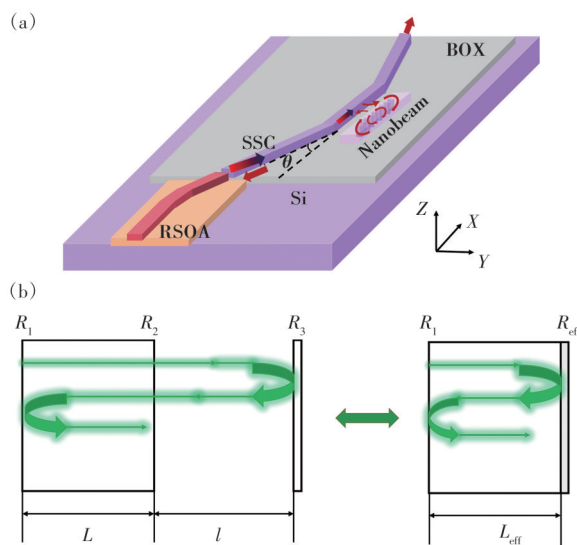


图1 (a)基于 nanobeam 腔的 ECDL 结构示意图;(b)ECDL 的等效光学分析模型

Fig.1 (a) The schematic of the nanobeam-based ECDL. (b) The equivalent optical model of the ECDL

ECDL 中各谐振腔的界面反射率分别记作 R_1, R_2, R_3 , 如图 1(b) 所示, 对应的电场反射系数分别记为 r_1, r_2, r_3 。将 R_2, R_3 之间的外腔等效为单一界面, 其反射率记作 R_{eff} , 电场反射系数 r_{eff} 可表示为:

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_2 + r_3 \eta e^{i4\pi n_{\text{ext}} l / \lambda}}{1 + r_2 r_3 \eta e^{i4\pi n_{\text{ext}} l / \lambda}}, \quad (1)$$

α 为 RSOA 内部损耗, η 为 RSOA 与 nanobeam 腔之间的耦合系数, g 为 RSOA 增益系数, ECDL 的等效腔长 $L_{\text{eff}} = n_{\text{int}} L + n_{\text{ext}} l$, n_{int} 是长为 L 的 RSOA 有源区波导对于激光基模的有效折射率, n_{ext} 为外腔 (长为 l) 基模有效折射率。阈值增益为:

$$g_{\text{th}} = \alpha + \frac{1}{2L_{\text{eff}}} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}} + 2 \ln \frac{1}{\eta} \right), \quad (2)$$

激光相位平衡条件为:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\text{eff}} + \phi_{r1} + \phi_{r_{\text{eff}}} = 2n\pi, \quad (3)$$

其中 $\phi_{r1}, \phi_{r_{\text{eff}}}$ 分别为光在面 R_1 和等效反射面 R_{eff} 发生反射时引入的相位变化。激光器阈值载流子浓度 N_{th} 与阈值增益系数的关系为:

$$N_{\text{th}} = \frac{g_{\text{th}}}{\Gamma g_0} + N_{\text{tr}}, \quad (4)$$

其中 Γ 为 ECDL 整体谐振腔中的等效光场限制因子, g_0 为增益介质的微分增益系数, N_{tr} 为透明载流子浓度。ECDL 的阈值电流可以表示为:

$$I_{\text{th}} = qV(AN_{\text{th}} + BN_{\text{th}}^2 + CN_{\text{th}}^3), \quad (5)$$

其中 q 为电子电荷, V 为 RSOA 有源区体积, A 为非辐射复合系数, B 为自发辐射复合系数, C 为俄歇复合系数。通过三维时域有限差分 (3D-finite differential time domain, 3D-FDTD) 数值方法可以模拟 nanobeam 腔的幅频和相频特性, 结合上述模型, 代入实际 RSOA 器件参数 (r_1, r_2, L, α, g 等) 可以定量分析 ECDL 的激光特性。

3 ECDL 外腔结构与优化

构成激光器外腔的硅基 PIC 部分包括 SSC、nanobeam 腔、硅基引线波导和定向耦合器。我们按照标准硅光工艺^[24]方案结合电子束光刻工艺制备相关硅基外腔器件, 衬底采用绝缘体上硅 (Silicon-on-insulator, SOI) 晶圆, 顶硅层厚度 220 nm, 氧化埋层厚度 3 μm 。选择 500 nm 宽度的矩形横截面结构来保证硅基引线波导工作在单 TE 模式。

3.1 模斑转换器设计

为了实现 RSOA 与外腔芯片之间的高效光耦

合, 我们设计了锥形 SSC, 并将其工作波段选为 1 500~1 600 nm, 用以匹配 RSOA 增益谱。

在 SOI 晶圆上制备的 SSC 如图 2 所示。其长度 $L_1=300 \mu\text{m}$, 底部宽度 $W=500 \text{ nm}$, 尖端宽度 $W_1=150 \text{ nm}$ 。测得 RSOA 发射荧光以 19.5° 从芯片边缘出射, 我们将 SSC 倾斜一定角度 θ 来匹配这个角度, 如图 1(a) 所示。图 3(a) 为不同 θ 下的 SSC 耦合效率仿真结果, 当 θ 为 11.2° 时, 实现了最大耦合效率。

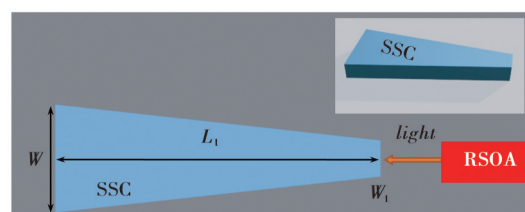


图 2 SSC 结构示意图, 插图为 SSC 三维模型

Fig.2 The schematic of the SSC. Insert: the 3D-view of the SSC

在 1 550 nm 波长下, SSC 尖端 TE 基模仿真结果如图 3(b), 在距离 RSOA 端面 5 μm 处 (与实验条件一致), TE 基模仿真结果如图 3(c), 我们通过计算模式重叠积分得到模式失配损耗为 -0.8 dB。图 3(d) 为测量 SSC 耦合损耗实验装置示意图, 激光通过透镜光纤与 SSC 耦合进入波导并在芯片另一端通过 SSC 与透镜光纤耦合进入光功率计。我们测量了 SSC 在 1 500~1 600 nm 波段下的耦合损耗, 如图 3(e) 所示。图 3(f) 为 SSC 在光波长为 1 550 nm 时的对准容差测量结果, 结果表明水平/垂直方向 3 dB 对准容差为 $\pm 1 \mu\text{m}/\pm 2 \mu\text{m}$, 具有良好的鲁棒性。

3.2 光子晶体纳米束腔设计

我们设计了一种基于定向耦合的一维硅基光子晶体 nanobeam 腔作为 ECDL 的外腔, 如图 4(a) 所示。RSOA 输出光波通过图 4(a) 左上方的曲线硅波导耦合进入 nanobeam 腔, ECDL 输出激光通过图 4(a) 右上方的曲线硅波导输出。PIC 上的所有器件厚度为 220 nm, 以便与 220 nm SOI 晶圆对应的标准硅光工艺兼容。单模曲线硅波导宽度 $w=500 \text{ nm}$, nanobeam 腔宽度 $d=700 \text{ nm}$, nanobeam 腔采用空气外包层, 圆孔填充空气, 孔半径为 135 nm。渐变区圆孔数量 $N_{\text{taper}}=15$, 反射区圆孔数量 $N_{\text{mirror}}=10$ 。利用电子束光刻工艺制备的 nanobeam 腔的扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 照片如图 4(b) 所示。

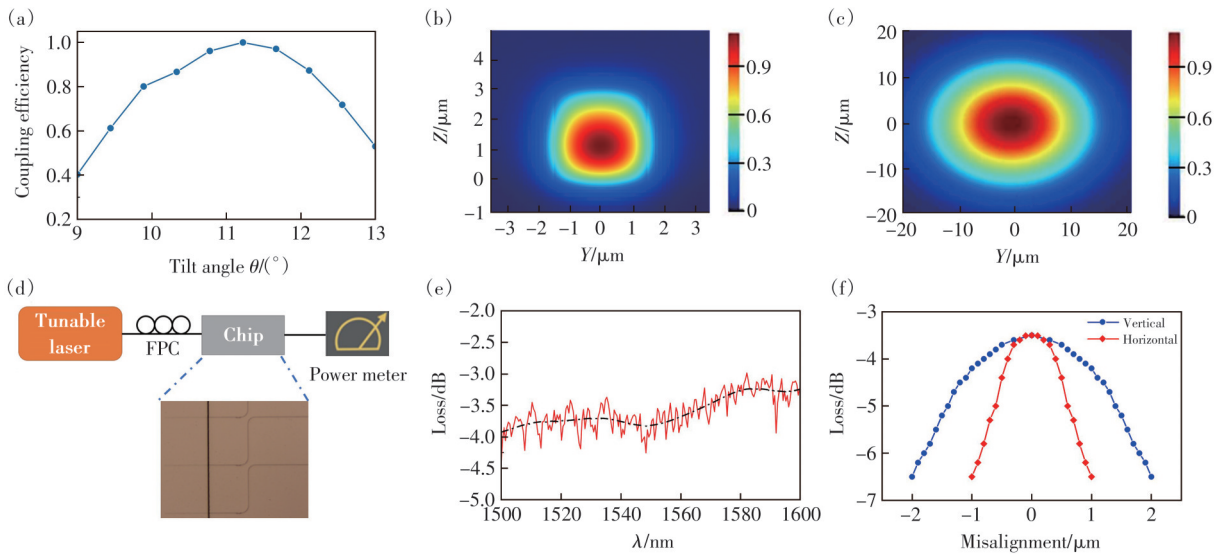


图3 SSC与RSOA集成仿真与实验结果。(a)光波长为1 550 nm时SSC不同倾斜角度时的耦合效率仿真,耦合效率最大值为归一化因子;(b)SSC尖端横截面内TE模场分布;(c)距RSOA出光端面5 μm处TE模场分布;(d)SSC耦合测量实验装置,插图为SSC的显微照片;(e)SSC耦合损耗测量结果;(f)SSC水平/垂直方向对准容差测量结果

Fig.3 The simulation and experimental results of the integration of the SSC and the RSOA. (a)The simulated coupling efficiency of the SSC under different tilt angles at 1 550 nm. The results are normalized by the maximum coupling efficiency. (b) The TE mode profile in the cross section of the SSC tip. (c)The TE mode profile at a distance of 5 μm from the RSOA output edge. (d)The measurement setup for SSC characterization. Insert: microscope image of the SSC. (e)The measured insertion loss of the SSC. (f)The measured misalignment tolerance of the SSC in the horizontal(y -axis)/vertical direction (z -axis) direction

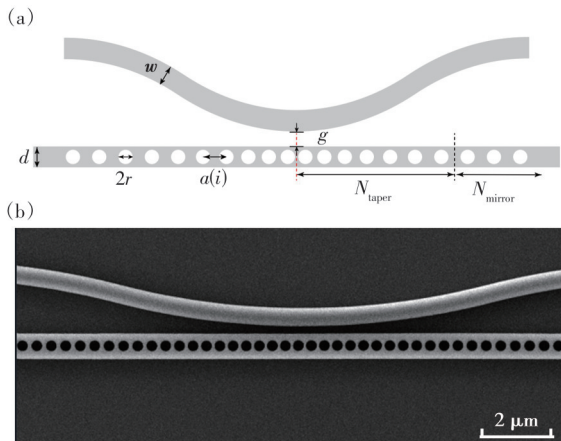


图4 (a)ECDL中集成的nanobeam腔结构示意图;(b) nanobeam腔的SEM照片

Fig.4 (a)The schematic of the nanobeam cavity used in the ECDL. (b)The SEM image of the nanobeam cavity

利用经典 nanobeam 腔设计理论^[25],采用高斯型反射镜强度分布来减少 nanobeam 腔的光学损耗,以提高品质因子(Q)。该设计方法除了应用于 SOI 体系,还可应用在氮化硅^[15]、二氧化硅^[26]等多种介质材料体系中。nanobeam 腔中的圆孔间距从中心的 $a(1)=350$ nm 按公式(6)所示的抛物线关系渐变为两侧的 $a(\text{end})=390$ nm:

$$a(i) = a(1) + \frac{i^2[a(\text{end}) - a(1)]}{(N_{\text{taper}} - 1)^2}, \quad (6)$$

图5(a)展示了在 Bloch 边界条件下,使用 3D-FDTD 方法仿真的晶格常数为 $a(1)=350$ nm、 $a(\text{end})=390$ nm 时的 TE 模式光子能带图。 $a(\text{end})$ 为令镜像强度 γ 取得最大时的晶格常数,如图5(b)所示。镜像强度计算公式为:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2 + \omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega_{\text{res}} - \omega_0}{\omega_0}\right)^2}, \quad (7)$$

其中 ω_{res} 为 nanobeam 腔谐振频率, ω_1 、 ω_2 和 ω_0 分别代表空气带边频率、介质带边频率和带边的中心频率。图5(a)中实心圆点所示的介质带边频率是目标谐振频率。

当图4(a)中的耦合间隙 g 取不同值时, nanobeam 腔谐振波长处的反射率和透射率如图6(a)所示。考虑到现有的标准硅光工艺加工特征尺寸在 180 nm 附近,因此我们选择 $g=185$ nm,可获得较高的反射率,以便降低 ECDL 的阈值增益。所设计的 nanobeam 腔的反射谱与透射谱如图6(b)、(c)所示,基模谐振峰位于 1 556.7 nm, Q 约为 2×10^5 。在 1 500~1 650 nm 波长范围内,只有一个谐振

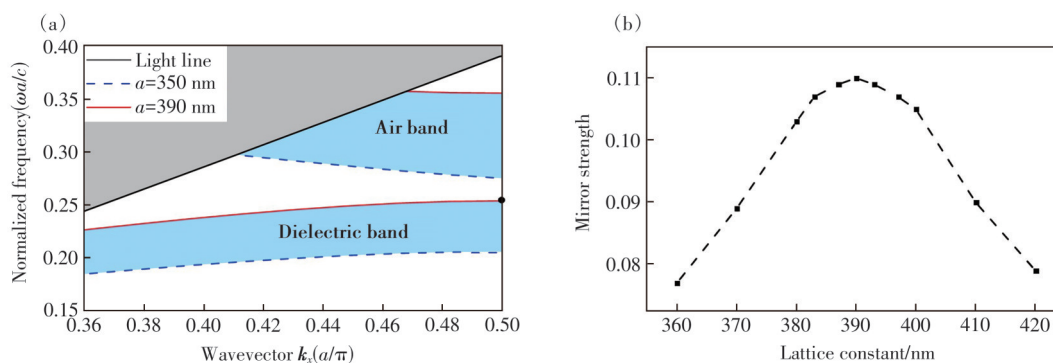


图5 (a)nanobeam腔的光子能带结构;(b)镜像强度仿真结果

Fig.5 (a)The simulated band structure of the nanobeam cavity. (b)The mirror strength

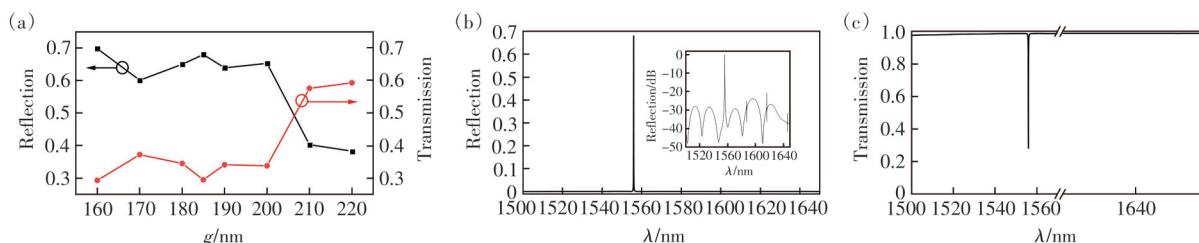


图6 nanobeam腔仿真结果。(a)耦合距离对nanobeam腔谐振波长处透射率和反射率的影响;nanobeam腔的反射谱(b)和透射谱(c)

Fig.6 The simulated results of the nanobeam cavity. (a)The relationship between the coupling gap and the reflection/transmission ratio at the resonance wavelength. The reflection spectrum(b) and transmission spectrum(c) of the nanobeam cavity

峰,边模抑制比大于 20 dB,表明 nanobeam 腔自由谱域宽度大于 150 nm,远大于具有相同量级 Q 的微环谐振腔,有利于构建窄线宽超小尺寸 ECDL。

4 仿真结果与讨论

在确定了 ECDL 外腔结构和 SSC 结构后,我们使用传输线模型^[27]对 RSOA 进行仿真。nanobeam 腔的光学传输特性采用 3D-FDTD 方法进行仿真。仿真采用的 RSOA 具体参数如下:经验增益系数 $g_0=18 \text{ cm}^{-1}$,透明载流子浓度 $N_{tr}=1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,洛伦兹线型因子 $P=20$,泵浦电流为 60 mA,增益曲线的中心波长 $\lambda_c=1550 \text{ nm}$ 。RSOA 的增益 g_{RSOA} 与载流子浓度 N 的关系可以表示为^[23]:

$$g_{\text{RSOA}} = g_0 \frac{\ln \frac{N}{N_{tr}}}{1 + \frac{P(\lambda - \lambda_c)^2}{2\lambda_c}}, \quad (8)$$

ECDL 的输出光谱仿真结果如图 7(a)所示,表明在 1500~1600 nm 波长范围内仅有一个激射主峰,处于 1556.7 nm,呈现优异的单模激射特性。

仿真中我们分别通过改变 nanobeam 腔外包层折射率(Refractive index, RI)和温度来实现波长调谐,如图 7(b)、(c)所示。两种物理量的变化步

长分别为 0.02 折射率单位(Refractive index unit, RIU)和 25 K, ECDL 的输出光谱如图 7(d)~(e)所示。仿真结果表明,当 nanobeam 腔外包层折射率从 1.0 增加到 1.1 时,其调谐范围达到了 12 nm;温度从 300 K 增加到 400 K 时,调谐范围达到了 8 nm,两种调谐方式的调谐效率分别为 120 nm/RIU 和 0.08 nm/K。我们所设计的外腔结构的外包层为空气,相比于外包层为二氧化硅的微环外腔^[20-21], nanobeam 腔的光场与环境有更多的相互作用,可以更敏锐地探测环境折射率变化,因此在折射率传感领域具有重要应用前景。图 7(f)为激光器的噪声功率谱密度仿真结果,根据激光器线宽理论^[28]可得线宽约为 30 kHz。

对比已报道的 ECDL 研究成果, Li 等^[16]采用半径为 5.3 μm 的微环外腔实现了 17 nm 的调谐范围和 150 kHz 的激光线宽; Guan 等^[18]利用半径分别为 20 μm 和 16.4 μm 的双环外腔结构,得到激光线宽为 37 kHz; Stern 等^[29]使用半径 120 μm 的微环,得到激光线宽为 13 kHz。相比之下,本工作设计的 nanobeam 腔尺寸仅为 0.7 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 实现了线宽为 30 kHz 的激光发射,采用折射率调谐时调谐范围超过 12 nm,其器件尺寸小于传统微环外腔,具有明显的集成优势。

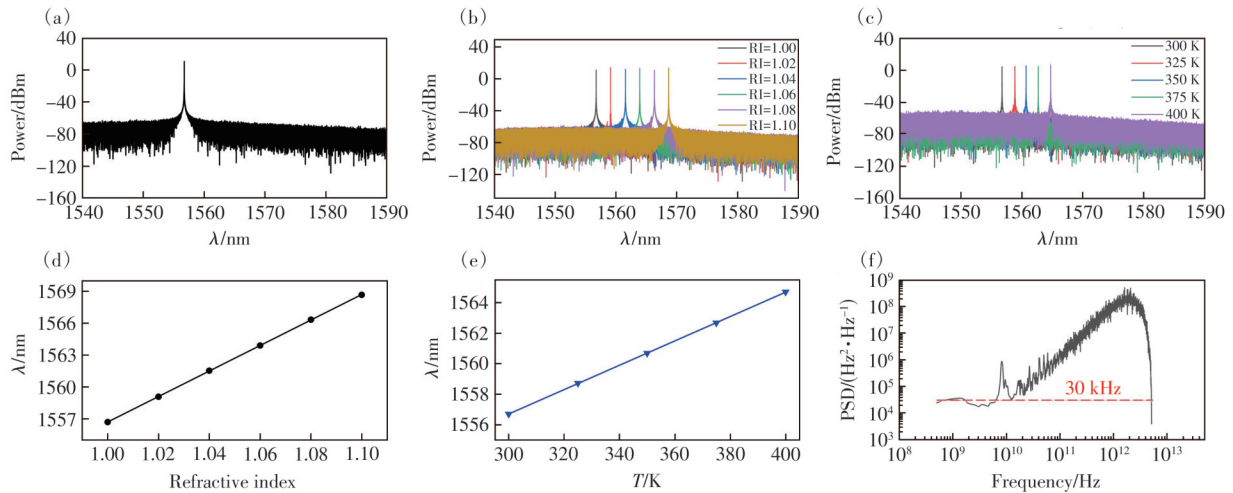


图7 ECDL的光谱与线宽特性。(a)具有空气外包层的ECDL光谱;(b)不同外包层折射率对ECDL光谱的影响,RI: Refractive index;(c)不同温度下的ECDL光谱;(d)ECDL激光波长与外包层折射率的关系;(e)ECDL激光波长与温度的关系;(f)ECDL噪声功率谱密度

Fig.7 The simulated spectral and linewidth of the ECDL. (a)The ECDL spectrum with air top cladding. (b)The influence of the refractive index of the top cladding on the ECDL spectrum, RI: Refractive index. (c)The influence of the temperature of the external cavity on the ECDL spectrum. (d)The relationship between the lasing wavelength and the refractive index of the top cladding of the ECDL. (e)The relationship between the lasing wavelength and the temperature of the external cavity of the ECDL. (f)The power spectral density of the noise of the ECDL

考虑到器件制备中的加工误差,RSOA芯片与SSC耦合时的插入损耗的值要高于仿真值,从而对ECDL的阈值产生不利影响。当ECDL的泵浦电流为50 mA时,RSOA输出光谱的仿真结果如图8(a)所示。当ECDL外腔整体插入损耗分别为-0.8 dB、-3 dB、-3.5 dB、-6 dB和-10 dB时,ECDL输出光谱如图8(b)~(f)所示。在相同的泵浦电流下,随着插入损耗的增加,ECDL激光特性

逐渐恶化。上述插入损耗对ECDL输出光功率及阈值电流的影响如图9(a)、(b)所示,输出光功率-泵浦电流(PI)曲线表明,ECDL的阈值电流随外腔的插入损耗增加而增大。外腔反射率对ECDL的PI特性的影响如图9(c)、(d)所示,当外腔反射率增加时阈值电流会随之降低。外腔反射率主要由nanobeam腔的反射率和定向耦合器的耦合系数决定。

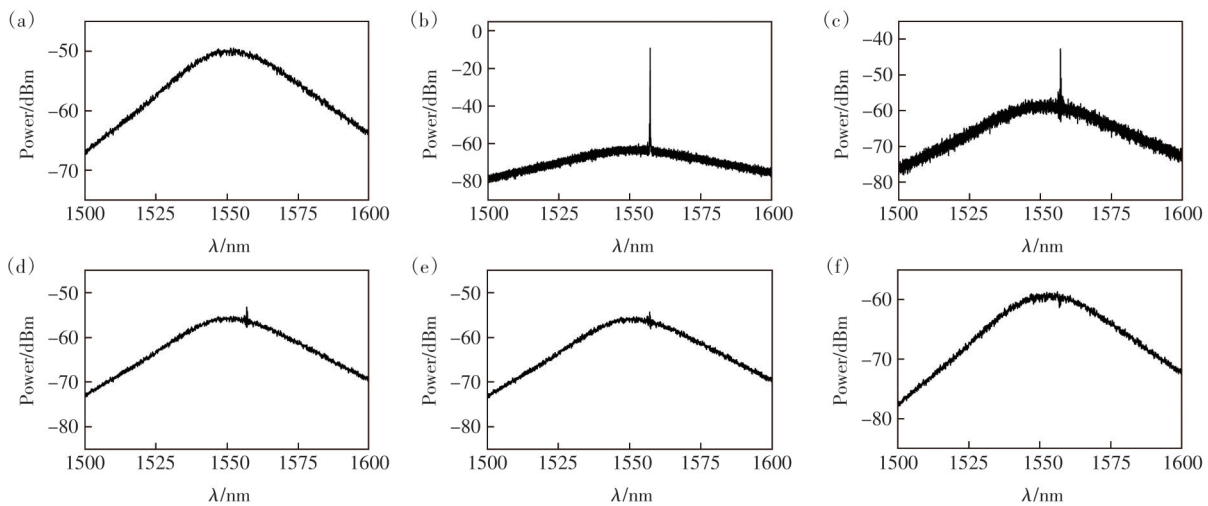


图8 RSOA与ECDL光谱仿真结果。(a)RSOA光谱;不同外腔插入损耗下的ECDL光谱:(b)-0.8 dB,(c)-3 dB,(d)-3.5 dB,(e)-6 dB,(f)-10 dB

Fig.8 The simulated spectra of RSOA and ECDL. (a)The spectrum of RSOA. The spectra of ECDL under different insertion losses of the external cavity: (b)-0.8 dB, (c)-3 dB, (d)-3.5 dB, (e)-6 dB, and (f)-10 dB

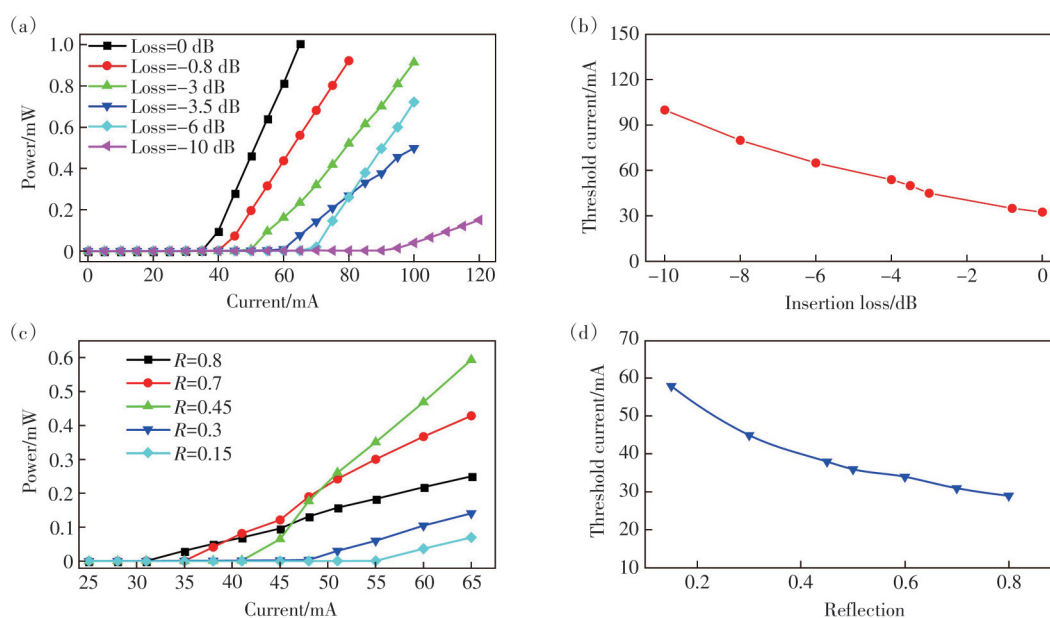


图 9 ECDL 的 PI 曲线仿真结果。(a) 外腔插入损耗对 PI 曲线的影响;(b) 外腔插入损耗对 ECDL 阈值电流的影响;(c) 外腔反射率对 PI 曲线的影响;(d) 外腔反射率对 ECDL 阈值电流的影响

Fig. 9 The simulated PI curves of the ECDL. (a) The PI curves under different insertion losses of the external cavities. (b) The influence of the insertion loss of the external cavity on the threshold current of the ECDL. (c) The PI curves with different reflectivity of the external cavities. (d) The influence of the power reflectivity of the external cavity on the threshold current of the ECDL

5 结 论

本文提出了利用 nanobeam 腔作为外腔来构建可调谐硅基 ECDL 的方案,并演示了 ECDL 中的 nanobeam 腔,尺寸仅为 $0.7 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,远小于文献[18, 29]报道的微环腔。同时, ECDL 线宽仿真值为 30 kHz,与上述报道处于同一量级。演示了用于 RSOA 与硅基 PIC 进行耦合所需的 SSC,其在 1 500~1 600 nm 波段展现出较低的耦合损耗和良好的鲁棒性。仿真表明, nanobeam 腔的 Q 值约为 2×10^5 ,谐振波长为 1 556.7 nm,基于该腔设计的 ECDL 实现了同波长的单模激励并且该 ECDL 的折射率调谐效率高达 120 nm/

RIU。进一步定量分析了实际外腔插入损耗和外腔反射率对 ECDL 阈值电流的影响,为研制高集成度的窄线宽可调谐 ECDL 提供了可行性验证。

致谢

特别感谢段冰、刘嵩义、潘廷扬、倪立岩和王一凡在器件制备、仿真以及论文撰写方面提供的建议与帮助。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250169>

参 考 文 献:

- [1] CORCORAN B, MITCHELL A, MORANDOTTI R, *et al.* Optical microcombs for ultrahigh-bandwidth communications [J]. *Nat. Photonics*, 2025, 19(5): 451-462.
- [2] FANG X S, ZHU Y X, CAI X, *et al.* Overcoming laser phase noise for low-cost coherent optical communication [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 6339.
- [3] RICCHIUTI G, WALSH A, MENDOZA-CASTRO J H, *et al.* Photothermal spectroscopy on-chip sensor for the measurement of a PMMA film using a silicon nitride micro-ring resonator and an external cavity quantum cascade laser [J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(13): 2417-2427.
- [4] RIEMENSBERGER J, LUKASHCHUK A, KARPOV M, *et al.* Massively parallel coherent laser ranging using a soliton

- microcomb [J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 164-170.
- [5] HASEGAWA H, KANNO K, UCHIDA A. Parallel and deep reservoir computing using semiconductor lasers with optical feedback [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(5): 869-881.
- [6] 黄洛天, 梁耿钦, 李宗戈, 等. 外腔集成可调谐窄线宽半导体激光器研究发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(3): 0300001.
- HUANG L T, LIANG G Q, LI Z G, *et al.* Research progress on tunable narrow linewidth semiconductor lasers integrated with external cavity [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2025, 62(3): 0300001. (in Chinese)
- [7] 张楠, 谢启杰, 纳全鑫, 等. 硅量子点激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2023, 44(11): 2011-2026.
- ZHANG N, XIE Q J, NA Q X, *et al.* Research progress on silicon-based quantum dot lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(11): 2011-2026. (in Chinese)
- [8] ZHOU Z C, OU X P, FANG Y T, *et al.* Prospects and applications of on-chip lasers [J]. *eLight*, 2023, 3(1): 1.
- [9] SHANG C, WAN Y T, SELVIDGE J, *et al.* Perspectives on advances in quantum dot lasers and integration with Si photonic integrated circuits [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(9): 2555-2566.
- [10] ZHANG G J, CEN Q Z, HAO T F, *et al.* Self-injection locked silica external cavity narrow linewidth laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41(8): 2474-2483.
- [11] MAIER P, CHEN Y N, XU Y L, *et al.* Sub-kHz-linewidth external-cavity laser (ECL) with Si₃N₄ resonator used as a tunable pump for a Kerr frequency comb [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41(11): 3479-3490.
- [12] CHEN C, WEI F, HAN X Y, *et al.* Hybrid integrated Si₃N₄ external cavity laser with high power and narrow linewidth [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(16): 26078-26091.
- [13] ZHANG J H, CHENG Z W, DONG J J, *et al.* Cascaded nanobeam spectrometer with high resolution and scalability [J]. *Optica*, 2022, 9(5): 517-521.
- [14] ZHANG J H, WU B, CHENG J W, *et al.* Compact, efficient, and scalable nanobeam core for photonic matrix-vector multiplication [J]. *Optica*, 2024, 11(2): 190-196.
- [15] IADANZA S, MENDOZA-CASTRO J H, OLIVEIRA T, *et al.* High-*Q* asymmetrically cladded silicon nitride 1D photonic crystals cavities and hybrid external cavity lasers for sensing in air and liquids [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(18): 4183-4196.
- [16] LI S Y, ZHANG D, ZHAO J Y, *et al.* Silicon micro-ring tunable laser for coherent optical communication [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(6): 6341-6349.
- [17] CHEN L C, YU L, MA P F, *et al.* Design of Vernier ring for external cavity laser with high side mode suppression ratio and wide tuning range [J]. *Opt. Commun.*, 2024, 554: 130188.
- [18] GUAN H, NOVACK A, GALFSKY T, *et al.* Widely-tunable, narrow-linewidth III-V/silicon hybrid external-cavity laser for coherent communication [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(7): 7920-7933.
- [19] ZHANG J, SOLTANIAN E, HAQ B, *et al.* Integrated optical transmitter with micro-transfer-printed widely tunable III-V-on-Si laser [C]. *Proceedings of 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego California, USA*, 2022: 1-3.
- [20] GAO Y K, LO J C, LEE S, *et al.* High-power, narrow-linewidth, miniaturized silicon photonic tunable laser with accurate frequency control [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(2): 265-271.
- [21] TRAN M A, HUANG D N, GUO J, *et al.* Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2020, 26(2): 1500514.
- [22] CHOWDHURY S J, WICKREMASINGHE K, GRIST S M, *et al.* On-chip hybrid integration of swept frequency distributed-feedback laser with silicon photonic circuits using photonic wire bonding [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(3): 3085-3099.
- [23] COLDREN L A, CORZINE S W, MAŠANOVIĆ M L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* [M]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012.
- [24] YANG Y S, ZHAO H, REN X M, *et al.* Monolithic integration of laser onto multilayer silicon nitride photonic integrated circuits with high efficiency at telecom wavelength [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(18): 28912-28923.
- [25] QUAN Q M, LONCAR M. Deterministic design of wavelength scale, ultra-high *Q* photonic crystal nanobeam cavities [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(19): 18529-18542.

- [26] YANG D Q, CHEN X, ZHANG X, *et al.* High- Q , low-index-contrast photonic crystal nanofiber cavity for high sensitivity refractive index sensing [J]. *Appl. Opt.*, 2018, 57(24): 6958-6965.
- [27] FAN Y W, LAMMERINK R E M, MAK J, *et al.* Spectral linewidth analysis of semiconductor hybrid lasers with feedback from an external waveguide resonator circuit [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(26): 32767-32782.
- [28] DI DOMENICO G, SCHILT S, THOMANN P. Simple approach to the relation between laser frequency noise and laser line shape [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(25): 4801-4807.
- [29] STERN B, JI X C, DUTT A, *et al.* Compact narrow-linewidth integrated laser based on a low-loss silicon nitride ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42(21): 4541-4544.



胡清波(1998-),男,河南安阳人,硕士研究生,2020年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事微腔传感研究。
E-mail: huqingbo@bupt.edu.cn



杨大全(1986-),男,山东临沂人,博士,教授,2014年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事集成光学微腔在信息及感知等领域的交叉应用研究。
E-mail: ydq@bupt.edu.cn



杨一粟(1984-),男,北京人,博士,讲师,2015年于University of Delaware获得博士学位,主要从事硅基光子学研究。
E-mail: yangyisu@bupt.edu.cn