SCIENTIA SINICA Informationis





宽调谐窄线宽外腔半导体激光器研究进展

崔强^{1,2}, 雷宇鑫^{1*}, 陈泳屹^{1*}, 张德晓^{1,3}, 邱橙¹, 王野^{1,4}, 樊鲁太^{1,2}, 宋悦¹, 贾鹏¹, 梁磊¹, 王玉冰¹, 秦莉¹, 宁永强¹, 王立军^{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,长春 130033

2. 中国科学院大学大珩学院, 北京 100049

3. 吉光半导体科技有限公司, 长春 130033

4. 长春理工大学光电工程学院, 长春 130022

* 通信作者. E-mail: leiyuxin@ciomp.ac.cn, chenyy@ciomp.ac.cn, wanglj@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-03-01; 接受日期: 2022-03-08; 网络出版日期: 2022-07-12

国家重点研发计划 (批准号: 2020YFB2205902)、国家自然科学基金 (批准号: 62004194, 61935009)、吉林省科技发展项目 (批准 号: 20200401062GX)、长春市重点研发计划 (批准号: 21ZGG13, 21ZGN23) 和吉林省创新创业人才工程 (批准号: 2021Y008) 资 助项目

摘要 外腔型半导体激光器具有低噪声、高边模抑制比、高温度稳定性、结构简单、成本低等优势, 已成为实现宽调谐和窄线宽特性的优选方案,被广泛应用于光通信、激光雷达、环境监测、光谱分析、 光学相干断层扫描等前沿领域.本文详细介绍了宽调谐窄线宽外腔型半导体激光器的技术方案和发展 现状.按照不同的结构分类,深入分析其结构、工作原理及性能特点,讨论近年来国际前沿研究方案的 结构特点、关键技术、光学性能和应用领域.最后,对宽调谐窄线宽外腔型半导体激光器面临的挑战和 潜在的发展前景作出分析和展望.

关键词 宽调谐,窄线宽,外腔半导体激光器,半导体激光器,Littrow,Littman

1 引言

随着互联网时代的快速发展,光通信技术作为半导体激光器最重要的应用领域之一,对半导体激 光器的光谱调谐范围和线宽特性提出了更高的要求.优化光源的线宽特性可以提高光通信系统的传输 长度,传输容量;拓展光源的光谱调谐特性可以减少光通信网络中激光器的数量,提高通信网络灵活 性,有利于实现通信系统的小型化、集成化,从而降低成本^[1~3].此外,宽调谐窄线宽激光光源还在高 分辨率光谱分析^[4]、激光雷达^[5,6]、环境气体检测^[7]、相干光探测^[8]、空间相干激光通信^[9]、生物医 学^[10]、原子钟计时^[11]等领域有着广泛的应用.

引用格式: 崔强, 雷字鑫, 陈泳屹, 等. 宽调谐窄线宽外腔半导体激光器研究进展. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 1149–1168, doi: 10.1360/SSI-2022-0100
 Cui Q, Lei Y X, Cheng Y Y, et al. Advances in wide-tuning and narrow-linewidth external-cavity diode lasers (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 1149–1168, doi: 10.1360/SSI-2022-0100

© 2022《中国科学》杂志社



图 1 (网络版彩图) (a) ECDL 模型; (b) 等效腔面模型 Figure 1 (Color online) (a) ECDL model; (b) equivalent cavity surface model

传统的基于内腔反馈的半导体激光器,例如 DFB/DBR (distributed feedback/distributed Bragg reflector)半导体激光器,其固有的大光腔损耗和增益介质自发辐射等导致的线宽展宽影响难以消除,使其线宽特性受到极大程度制约^[12,13].且基于载流子色散效应的电调谐或基于热光效应的热调谐的调谐方式,限制了其波长调谐范围,通常仅有几纳米^[14,15].随着相关应用的发展,这种内反馈型半导体激光器的线宽特性和光谱特性已经不能满足日益增长的应用需求.因此,为了获得激光光源更宽的 波长调谐范围和更窄的线宽特性,研究人员引入了外腔型半导体激光器 (external cavity diode laser, ECDL)^[8]. ECDL 是在半导体激光增益芯片的基础上,利用外部选模元件和反射镜等,将谐振腔延展 到激光芯片外.相较于内腔反馈半导体激光器,ECDL 依靠其更长的腔长和外部谐振腔中更加灵活的调谐组件可以获得更窄的线宽和更宽的波长调谐范围.此外,ECDL 还具有结构简单、边模抑制比 (side mode suppression ratio, SMSR) 高、噪声低、温度稳定性高等优势,因此成为近年来的研究热点.

本文就 ECDL 的研究进展进行阐述. 第1节中,从 ECDL 的基本结构原理出发,根据外腔结构不同对 ECDL 进行分类,阐述了不同类别 ECDL 的基本结构,以及它们的波长调谐和线宽压窄原理. 第2节中,讨论了不同类型 ECDL 的最新研究进展,分析了各自的特点、关键技术及应用领域.最后,对目前 ECDL 的整体发展现状进行总结,并讨论了 ECDL 面临的挑战和潜在的发展方向.

2 ECDL 结构及原理

ECDL 结构通常是由有源增益内腔部分和无源反馈外腔部分构成,有源增益内腔部分一般为增益 芯片,用于提供光谱增益,它的增益谱范围决定了激光器的最大波长调谐范围;无源反馈外腔部分通 常由光栅、滤波器、波导等光学反馈元件构成,激光器的波长调谐和线宽压窄功能主要通过外腔实现. ECDL 结构可等效为如图 1(a) 所示的模型结构,其中 *R*₁ 和 *R*₂ 是有源内腔两侧的反射率, *R*₃ 是无源 外腔的另一侧反射率.整个无源外腔部分可以看作是图 1(b) 的一个等效腔面 *R*_{eff} ^[16].

ECDL 可大体分为由各个分立模块耦合搭建的分立器件型 ECDL, 基于外部低损耗波导的波导型 ECDL 和与外部特殊光纤结构耦合的光纤型 ECDL 三个大类.

2.1 分立器件型 ECDL

分立器件型 ECDL 根据外部谐振腔中选模器件和选模机制的不同,又可以分为 Littrow 型外腔半导体激光器 (Littrow-ECDL)、Littman 型外腔半导体激光器 (Littman-ECDL) 和滤波器型外腔半导体激光器 (Filter-ECDL) 3 种结构.

2.1.1 Littrow-ECDL

如图 2 所示, Littrow 型外腔半导体激光器通常是由激光增益芯片、耦合透镜和衍射光栅组成. 外部谐振腔中的光栅是主要的选模元件, 具有波长调谐和线宽压窄的功能. Littrow 型 ECDL 的性能 很大程度上取决于光栅的性能表现, 通常选用的衍射光栅有反射光栅^[17~19]、透射光栅^[20]、闪耀光 栅^[21]等.

激光增益芯片输出的光束经准直透镜准直,照射到光栅上发生衍射,产生的一级衍射光沿入射光路反馈回激光增益芯片的有源区,激光增益芯片的反射端面和光栅构成谐振腔,零级光作为输出激光. 根据谐振腔的谐振模式公式 (1) 和光栅最小损耗波长公式 (2),可得出满足条件的激射波长^[22].

$$L = q(\lambda_q/2),\tag{1}$$

$$\lambda = 2a\sin\theta,\tag{2}$$

其中 L 为有效腔长, q 是正整数, λ 是波长, a 是光栅周期, θ 是光栅衍射角. 转动光栅角度, 改变一级 衍射角 θ , 从而调整谐振腔的激射波长, 实现波长调谐的功能. 理想条件下, Littrow 型外腔半导体激光器的波长调谐范围近似于激光芯片的增益谱宽.

光栅外腔激光器线宽公式 [23]

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{(1+\alpha^2)\cos^2\varphi} \frac{R_2}{(1-R_2)^2 R_d} \left(\frac{nl}{L}\right)^2,$$
(3)

其中 Δν 是外腔激光器线宽, Δν₀ 是增益芯片线宽, α 是线宽展宽因子, cosφ 是相位匹配因子, R₂ 是 激光器谐振腔后端面反射率, R_d 是光栅的一级衍射效率, l 是激光器内腔长. 以光栅构建外部谐振腔 可以极大地增加激光器谐振腔的有效腔长, 引入光栅端面相当于增加谐振腔的端面反射率, 阈值增益 减小, 有利于增大受激辐射抑制自发辐射, 使得激光器线宽变窄.

2.1.2 Littman-ECDL

如图 3 所示, Littman 型外腔半导体激光器通常是在 Littrow 外腔结构的基础上, 在光栅侧添加一个反射镜构成. 激光芯片发射的光束照射到光栅上后, 一级衍射光经过反射镜的反射回到光栅发生第 2 次衍射, 再沿入射光路反馈回激光芯片的有源区, 形成谐振. 与 Littrow 结构不同, 这里旋转反射镜 代替旋转光栅进行波长调谐控制.

如图 4 所示为 Littman-ECDL 模式选择原理图. 图 4(a) 为增益芯片的增益谱范围内, 反射镜和 光栅使光仅在损耗骤降的 $\delta\lambda$ 波长范围内发生光反馈谐振. 图 4(b) 和 (c) 分别为激光增益芯片与外腔 激光器的光谱图. 激光增益芯片的纵模间隔 ($\Delta\lambda_d$) 和外腔激光器的纵模间隔 ($\Delta\lambda_c$) 如下 ^[24]:

$$\Delta \lambda_d = \frac{\lambda^2}{2n_g l},\tag{4}$$

$$\Delta\lambda_c = \frac{\lambda^2}{2(L_f + L_d + L_r)},\tag{5}$$

其中 n_g 是群折射率, L_f 为激光出射点到准直透镜之间的距离, L_d 为准直透镜到衍射光栅之间的距离, L_r 为衍射光栅到调谐反射镜之间的距离. 由于外腔长远大于内腔长, 所以外腔自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 比内腔小得多, 如图 4(c) 和 (b) 所示. 经过图 4(d) 所示的增益饱和竞争和模式 竞争, $\delta\lambda$ 范围内的峰值波长形成单纵模激射, 如图 4(e) 所示. 旋转反射镜, $\delta\lambda$ 范围将会移动, 从而实 现波长调谐的功能.



图 2 (网络版彩图) Littrow 结构原理图 Figure 2 (Color online) Schematic of Littrow structure



图 3 (网络版彩图) Littman 结构原理图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of Littman structure





Figure 4 Schematic of Littman-ECDL mode selection. (a) Gain-medium gain curve and loss curve; (b) gain chip spectrogram; (c) external-cavity spectrogram; (d) gain-saturation competition; (e) mode competition results in a single longitudinal mode Littman-ECDL 的线宽可以表示为^[25]

$$\Delta \nu = \Delta \nu_0 \frac{1}{[1 + \tau/\tau_{\rm in}(1 - \sqrt{R_2/R_{\rm out}})]^2},\tag{6}$$

其中 R_{out} = R_rR_dR_d 为外腔的反射率, R_r 为反射镜的反射率, τ, τ_{in} 分别为光子在激光增益芯片有源 区和外腔往返渡越的时间,与激光器的内腔长和外腔长度有关.因此,Littman 型外腔半导体激光器的 输出线宽与外腔长度、激光增益芯片输出端面反射率、光栅一级衍射效率,以及调谐反射镜反射率密 切相关^[26].此外,研究人员还发现,光栅分辨率越高,线宽越窄^[27].

2.1.3 Filter-ECDL

滤波器型外腔半导体激光器通常是由激光增益芯片和外部谐振腔中具有光学滤波功能的器件构成,基本结构如图 5 所示.

目前常用的光学滤波器件有 FP (Fabry-Perot) 腔标准具^[28]、声光可调谐滤波器 (acousto-optic tunable filter, AOTF)^[29,30]、电光可调谐滤波器^[31]、双折射滤光片 (birefringent filter, BRF)^[32,33]、干 涉滤波器 (interference filter, IF)^[34,35]、微机电系统 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 可调光 滤波器^[36]、全介质膜 FP 滤波器 (all-dielectric thin film fabry-perot filter, AFPF)^[37]、导模谐振腔滤 波器 (guided-mode resonator filter, GMRF)^[38]、液晶片^[39]等. 选用不同的光学滤波器,激光器的波长 调谐和线宽压窄机理也会随之变化,展现出较大差异的性能表现. 滤波器型外腔半导体激光器最显著 特点是其极高的自由度. 外部谐振腔中光学滤波器件的模式选择功能是滤波器型外腔半导体激光器最显著 特点是其极高的自由度. 外部谐振腔中光学滤波器件的模式选择功能是滤波器型外腔半导体激光器能 够实现单纵模输出的重要因素. 一般情况下,上述光学滤波器件自身具有选模特性,存在一个具有最高透射率的模式,当激光增益芯片出射的多模激光经过光学滤波器件时,仅具有最高透射峰波长的光 束可以通过,实现纵模选择. 但也有一部分光学滤波器的透射谱是周期梳状谱,不具有单独选模功能,需要与其他器件或者激光器配合,通过光谱叠加、模式竞争出现最高透过峰,实现单纵模输出.因此, Filter-ECDL 的波长调谐原理是基于改变滤波器的折射率、透射角度、或者调谐腔长而改变周期梳状 谱的 FSR 等,致使最大透过峰峰值的波长位置变动而实现的. 同时配合相位匹配部分,可在增加有效 腔长以及滤波器精准选模的基础上进一步压窄线宽.

2.2 波导型 ECDL

如图 6 所示, 微环谐振器 (microring resonator, MRR) 型外腔半导体激光器 (MRR-ECDL), 通常是 由半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 增益芯片和作为外部谐振腔的平面光波导 耦合形成. 光波导通常具有相位调节部分和微环谐振器结构, MRR 为半径不等的双微环结构, 通过非 对称耦合实现选模功能. 此外, 研究人员也会在光波导中加入马赫曾德干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[40] 等辅助结构, 以提升激光器的整体性能. 目前常用的 MRR 光波导有 Si 基^[19,41~43]、 SiON 基、Si₃N₄ 基^[40,44] 等.

MRR-ECDL 的选模机理通常是通过两个 FSR 不同的 MRR 光谱叠加实现的. 如图 7(b) 和 (c) 所示, 两 FSR 不同的滤波器进行光谱叠加, 正好有一 λ₁ 峰值波长对准, 其他峰值刚好错开, 形成图 7(d) 所示叠加光谱图, 激光器实现单模运转.

在此基础上通过载流子色散效应或者热光效应对 MRR 进行电调谐或者热调谐,改变波导有效折射率,根据光在微环中实现谐振的条件公式 (7),实现谐振波长的调谐功能.

$$q\lambda_q = n_{\text{eff}}L,\tag{7}$$







图 6 (网络版彩图) MRR-ECDL 结构原理图 Figure 6 (Color online) Schematic of MRR-ECDL structure





Figure 7 Schematic of MRR-ECDL mode selection based on cursor effect. (a) Gain-medium gain curve; (b) "filter 1" comb spectrum; (c) "filter 2" comb spectrum; (d) superimposed spectra of two filters

其中 n_{eff} 是波导有效折射率. 但由于材料折射率限制, 若仅调节单个滤波器, 其调谐范围通常仅有几 个 nm. 因此研究人员引入了游标效应, 实现宽波长范围调谐. 通过调节双 MRR 中的一个, 使其光 谱仅移动一小段距离, 那么两个 MRR 的光谱对准波长就可以从 λ₁ 变动到 λ₂, 实现较大范围的峰值 波长切换. 若同时调节双 MRR, 其光谱会保持在对准状态下进行整体移动, 从而实现激射波长的连续 调谐.

该类激光器线宽的降低主要是通过低损耗波导、谐振腔高Q因子和增加有效腔长实现的,并且微环波导结构可以在小尺寸下极大地增加有效腔长.

2.3 光纤型 ECDL

得益于光纤光栅工艺的不断进步,研究人员在外腔型半导体激光器中引入了光纤布拉格光栅 (fiber

1154



图 8 (网络版彩图) FBG-ECDL 结构原理图

Figure 8 (Color online) Schematic diagram of FBG-ECDL structure

Bragg grating, FBG) 结构, 即在增益芯片的一端镀增透膜, 通过锥形光纤透镜与外部谐振腔中的光纤光栅进行耦合, 形成光纤布拉格光栅型外腔半导体激光器 (FBG-ECDL), 结构如图 8 所示.

通过调整 FBG 的温度或者外界施加的应力,可以改变光纤光栅的布拉格波长,从而实现对 FBG-ECDL 波长的调谐功能.并且,由于光纤光栅斜边处的大群时延特性可对半导体激光器的线宽进行有效的压窄,因此 FBG-ECDL 具有极窄的线宽特性以及良好的动态单模特性.

3 ECDL 研究进展

3.1 分立器件型 ECDL

3.1.1 Littrow-ECDL

Littrow-ECDL 具有较宽的波长调谐范围 (100 nm 甚至亚微米),可实现精细调节、结构简单易实现、输出功率较高等优点.但这类结构由于需要用到机械旋转部件,往往系统尺寸较大,光路的装调难度较高.并且,该类激光器的线宽往往较宽,多在 GHz 量级.又由于光栅具有较高的灵敏度,因此该结构较容易受到外部光噪声的影响.目前,清华大学^[45]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, CIOMP)^[17]、美国得克萨斯大学奥斯汀分校 (University of Texas, Austin)^[46]、俄罗斯圣彼得堡彼得大帝理工大学 (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University)^[18]、澳大利亚国立大学 (Australian National University)^[21]、芬兰坦佩雷大学 (University of Tampere)^[19]、立陶宛 Brolis 半导体公司^[47]、英国阿斯顿大学 (Aston University)^[48]等诸多研究机构都对其开展了深入的研究.

早在 20 世纪 60 年代, 就有研究人员提出在多波长激光器中采用 Littrow 结构进行波长选择^[49], 经过 50 余年的发展, 该技术已经有了长足的进步. 2019 年, 中国台湾成功大学的 Chen 等^[50] 报道了 在传统 Littrow 结构中的 445 nm 蓝色 InGaN 半导体激光器, 通过压电陶瓷 (piezoelectric ceramics, PZT) 调整光栅的位置, 实现了波长调谐范围超过 4 nm, 最大输出功率 20 mW, 线宽 4.7 MHz 的单纵 模激光输出.

但传统 Littrow 结构^[51~53] 从光栅端直接出光,输出光方向会随光栅旋转而变动.随着结构的进 一步改进^[48,54~56],当激光从增益芯片后端输出时,该问题得到有效的解决,现在多数研究方案都是 基于改进型 Littrow 结构. 2019 年, CIOMP 的 Wang 等^[17] 开展了基于双尺寸量子点的 ECDL 的研 究. 该激光器采用改进型 Littrow 外腔结构,激光从增益芯片的后端面输出,可以保证一级衍射光出 光,利于提高功率,保持出光方向不变.增益介质使用双模 InGaAs/GaAs 量子点激光器,准直透镜为 非球面镜,衍射光栅刻线密度为 1200 l/mm,总腔长是 78 mm. 该激光器通过旋转光栅角度,可实现 波长调谐范围为 28.9 nm (970.1~999 nm),线宽小于 0.2 nm,激光稳定输出功率为 120 mw. 2021 年, 清华大学^[45] 的研究人员研制了 1.5 μm 波段基于 InAs/InP 量子点激光器的 littrow-ECDL,调谐范围 达到了 92 nm, 500 mA 电流下最大输出功率为 6.5 mW. 同年, 瑞士 Alpes Lasers S.A 公司的 Giraud 等^[57] 采用改进型 Littrow 外腔结构, 以带间级联激光器为增益芯片, 实现了室温下 3.22~3.58 μm 的 360 nm (313 cm⁻¹) 波长调谐范围, 最大输出功率 13 mW.

为提升该类激光器的输出功率, 2019 年, 俄罗斯圣彼得堡彼得大帝理工大学的 Podoskin 等^[18] 开展了基于 InGaAs 量子阱的高功率可调谐 ECDL 的研究. 该激光器在原有 Littrow 外腔结构基础上增加了一个圆柱形透镜, 用来矫正发散辐射. 该激光器连续输出功率可达 13 W, 线宽 0.15 nm, 调谐范围达到 100 nm (960~1060 nm), SMSR 为 45 dB.

研究人员为减少背反射,降低内腔模式影响,激光增益芯片从直脊型波导逐渐改为采用倾斜端面 波导^[48,58]. 2020年,芬兰坦佩雷大学的 Ojanen 等^[19]基于倾斜端面波导激光芯片进行了可调谐 激光器的研究. 为减少模式跳变, 结构中的光栅沿外部轴点旋转, 激光器的调谐范围达到了 154 nm (2513~2667 nm), 平均最大输出功率为 10 mW, 峰值功率 100 mW. 随着研究人员的不断探索, Littrow 型外腔半导体激光器线宽也可压窄到 kHz 量级. 2020 年, 澳大利亚国立大学的 Kapasi 等^[21] 研制了 用于引力波探测的 2 μm 波段窄线宽可调谐激光器.采用反射式闪耀光栅,在 10 ms 积分时间内,线宽 压窄到了 20 kHz. 输出功率超过 9 mW, 高电流时可达 15 mW, 波长调谐范围 120 nm (中心波长 1920 nm). Littrow-ECDL 除旋转光栅进行波长调谐外, 也可通过平移准直透镜实现. 2010 年, 日本国际基 督教大学 (International Christian University) 的 Okamura 等^[59] 在 Littrow 结构中通过平移准直透镜 实现了约 8 nm 的连续调谐, 该激光器可以实现准直透镜平移 1 μm 导致激射波长改变约 1 nm. 此 外,研究人员还对 Littrow-ECDL 中衍射光栅的影响做了相关研究. 2016 年,丹麦技术大学 (Technical University of Denmark)的 Chi 等^[53]发现,采用全息衍射光栅时,激光器拥有更高的效率和更窄的线 宽, 而使用刻线衍射光栅时, 波长调谐范围要宽的多. 2017 年, 中国厦门大学的 Ding 等^[60] 发现由于 光栅的窄反馈波长范围能产生更好的模式选择效果.因此激光增益芯片的 PN 结与光栅刻线平行放置 比垂直放置具有更好的性能表现. 由于 Littrow-ECDL 的研究相对较成熟, 研究人员除了对激光器的 性能提升进行更深入探究外,对其应用也做了大量的报道.由于可以实现较宽的波长调谐范围和高光 谱分辨率^[61],该类型激光器多应用于气体光谱检测^[7,62]、工业过程控制^[63]及精密测量校准^[64,65]等 领域.

3.1.2 Littman-ECDL

Littrow 和 Littman 结构 ECDL, 都是通过改变外腔中选模器件的倾斜角度来实现波长的选择, 区别在于 Littman 结构的激光器经过两次光栅衍射选择波长, 所以相比于 Littrow 结构具有更好的模式选择特性^[66], 线宽可到达百 kHz 量级.并且调谐范围仍能保持在较宽的范围, 甚至有所提升.但由于引入额外的光学元件, 进一步增加了系统的复杂程度. 该结构仍存在系统尺寸较大、光路的装调难度高、易受外部光噪声影响等问题, 且比 Littrow-ECDL 具有更高的损耗.目前, 中国华中师范大学^[66]、西班牙马德里卡洛斯三世大学 (Universidad Carlos III deMadrid)^[67]、英国阿斯顿大学^[68]、德国 Sacher Lasertechnik 公司^[69] 等机构开展了 Littman-ECDL 研究.

Littman 外腔结构最初在 20 世纪 70 年代被用于染料激光器^[70], 直到 20 世纪 90 年代, 研究人员开始在 ECDL 中应用该结构^[71], 经过 20 余年的发展, 该结构已成为 ECDL 的经典结构类型之一. 2016 年, 中国华中师范大学的 Luo 等^[66] 报道了一种使用传统 Littman 外腔结构的 6.9 µm 波段外腔量子级联激光器, 通过旋转反射镜, 实现了 1340~1640 cm⁻¹, 范围超过 300 cm⁻¹ 的连续调谐, 线宽小于 0.14 cm⁻¹. 并且通过测定空气中水分的吸收光谱, 证明了外腔量子级联激光器的精细调谐能力.

研究人员在外腔结构中通常采用反射式衍射光栅实现选模功能,但也可选用透射式衍射光栅.

2018 年,韩国庆北大学 (Kyungpook National University) 的 Shirazi 等^[20] 开发了一种用于光学相 干层析成像 (optical coherence tomography, OCT) 系统的 ECDL. 该激光器采用透射式衍射光栅作 为 Littman 外腔选模器件. 激光经透镜准直后入射到透射型衍射光栅, 衍射光照射到调谐反射镜上再 反馈回谐振腔, 光栅透射光作为激光输出. 旋转反射镜, 实现 829.2~881.5 nm 波长调谐, 调谐范围达 52 nm.

与 Littrow 结构类似, 研究人员同样对 Littman 外腔结构的输出端面进行了改进, 从光栅端改为 芯片后端激光输出^[72], 这种设计在单模调谐和输出功率提升上取得了显著成效^[73]. 2018 年, 英国阿 斯顿大学的 Chichkov 等^[68] 开展了 3.2 μm 基于 GaSb 的级联 I 型量子阱可调谐激光器的研究. 该 方案采用改进型 Littman-Metcalf 结构, 以刻线密度为 450 l/mm 的光栅作为外部谐振腔的调谐组件, 增益芯片是具有窄脊波导结构的级联泵浦 GaSb 芯片. 实验结果显示, 该激光器室温下提供 8 mW 连续波输出功率, 并且在连续波和脉冲方式下, 波长调谐范围超过了 300 nm (3 μm 波段).

为了实现 Littman-ECDL 的小型化封装, 2017 年, 西班牙马德里卡洛斯三世大学的 Jiménez 等^[67]进行相关研究. 这种小型激光器被封装在紧凑的空间内, 具有输出功率高、窄线宽、可调谐、SMSR 高等特点, 可实现便携性和手持设备操作. 该激光器功率超过 50 mW, SMSR 达到 60 dB, 线宽小于 100 kHz, 但仅有 GHz 级调谐范围. 这是因为器件封装完成后, 反射镜的位置不能再变动, 仅能通过工作电流对波长进行微调, 由此限制了激光器的波长调谐范围.

为了在稳定性、可重复性和调谐范围及速度方面继续改进, 2019 年, 德国 Sacher Lasertechnik 公司的 Hoppe 等^[69]提出了一种新型基于 MEMS 系统的 Littman 外腔结构, 在噪声、尺寸、稳定性、可重复性和调谐范围上都有显著改进. 这种新型结构的变化在于激光束首先照射到可旋转的 MEMS 反射镜上, 再反射到反射光栅上, 光栅作为选频元件, 将一级衍射光反射回 MEMS 反射镜, 再反射回激光增益芯片形成振荡, 最后激光从芯片后端面出光, 其调谐速度可达到 kHz 量级. 通过 MEMS 旋转反射镜可以做到腔长、角度同时变化, 实现波长的无跳模调谐.

激光器的无跳模调谐在许多应用中非常重要,例如在频率扫描干涉中可以防止干涉条纹的失 真^[74]、降低测量不确定度^[75].然而,由于机械误差、振动、激光芯片面反射率、温度和空气条件的影 响,无跳模调谐范围在实际使用中仍然受到限制.许多理论研究已经证明了,通过选择合适的反射镜 枢轴点位置,配合激光器电流控制,可以实现外腔长度、光栅反馈角和内腔长度的三光谱同步调谐^[76], 结合模式匹配,可以有效扩大激光器的无跳模调谐范围^[77].此外,在Littman-ECDL结构的探究中,还 有研究人员使用屋顶棱镜代替平面镜,作为外腔反射器.因为屋顶棱镜可以保持沿一个方向反射,不 受倾斜角度的影响,并且具有良好的低散射光学质量^[78].

由于与 Littrow 外腔结构具有相似的结构和性能特点, Littman-ECDL 的应用领域也与其类似, 例 如光谱学^[76,79]、生物医学^[73,80]、精密测量^[20,81]和环境监测^[82]等.

3.1.3 Filter-ECDL

Filter-ECDL 与上述两种以光栅作为外腔选模器件的半导体激光器相比,其优势在于组件和结构的灵活度和自由度较高,可以根据具体的需求得到宽至百 nm 的波长调谐范围或窄至百 kHz 及以下的线宽特性.并且,调谐速度、输出功率、器件尺寸及紧凑度等特性也有很大的优化空间.中国科学院深圳先进技术研究院^[37]、中国科学院国家授时中心^[35]、香港理工大学^[28]、波兰电子技术研究所 (Institute of Electron Technology in Poland)^[83]、澳大利亚国防科学技术集团 (Australian Defense Science and Technology Group)^[29]、美国 Axsun Technol 公司^[84]、俄罗斯斯特尔马克波利乌斯研究所 (Stel'makh Polyus Research Institute)^[30] 等众多机构展开了对 Filter-ECDL 的深入研究.

1993 年, 美国 ThermoTrex 公司^[85] 的研究人员发现, 可以利用 PZT 微调外部反馈腔的腔长, 实现激光器输出频率的精细调节. 类似 FP 滤波器作为外部选模元件的 ECDL, 也通常采用改变腔长的方式进行波长调谐. 2010 年, 美国 Axsun Technol 公司的 Kuznetsov 等^[84]介绍了一种反射式 FP 腔可调谐激光器. 它使用硅 MEMS 可调谐 FP 滤波器作为外部选模元件, 滤波器由两个反射镜组成, 其中一个位于静电驱动的可移动硅膜上, 进行波长的离散调谐. 谐振腔另一端是光纤输出耦合端的反射器, 能有效增加激光器腔长. 利用该外腔结构, 他们实现了小型化集成封装, 演示了应用 OCT 中的 1060 和 1300 nm 波长的激光器, 调谐范围 140 nm, 扫描速率超过 100 kHz, 输出功率超过 100 mW.

2011年,香港理工大学^[28]的研究人员利用两个标准具的游标效应实现选模并提高了 SMSR. 制备的 ECDL 线宽小于 100 kHz,调谐范围达到 40 nm, SMSR 超过 60 dB,光纤耦合输出功率大于 20 mW.

FP 腔滤波器除了以上通过腔长改变实现波长调谐外,还可以通过旋转滤波器的方式实现. 2010 年,中国科学院深圳先进技术研究所的 Xiao 等^[37]利用了 AFPF 结合全反镜,制备了一种新型 结构的外腔半导体激光器. 当 AFPF 围绕一个支点旋转时,其峰值透射波长与激光束入射角余弦 值呈线性关系,以此进行波长调谐功能. 该激光器在 1550 nm 波段可实现无跳模调谐,调谐范围达 40 nm.

研究人员在以 IF 为选模元件方面,也做了大量的研究. 2012 年,澳大利亚墨尔本大学 (the University of Melbourne) 的 Thompson 等^[86] 开展了基于宽带宽 IF 外腔的窄线宽可调谐 ECDL 的研究. 该激光器通过旋转 IF 方式进行波长调谐. 波长调谐范围超过 14 nm,线宽为 26 kHz. 2018 年,中国北京工业大学的 Pan 等^[34] 开展了基于宽带宽 IF 的窄线宽 ECDL 的研究. 该研究得到了线宽约为 95 kHz 的激光输出,光谱纯度为 2.9 MHz,长期频率稳定性达到 5.59×10⁻¹². 2020 年,中国科学院国家授时中心的 Zhang 等^[35] 使用窄带宽 IF 对 ECDL 进行光谱选择,猫眼反射器提供光反馈. 该激光器工作波长在 698.45 nm 附近,电流控制调谐范围超过 40 GHz,压电控制调谐范围为 3 GHz,线宽约为 180 kHz,输出功率为 35 mW.

2017年,日本东北大学 (Tohoku University)的 Kasai 等^[87]以一个多层介电干涉滤光片和一个两端面都带有抗反射图层的 SiO₂ 板构成外腔选模组件.通过电机分别旋转多层介质干涉滤光片和 SiO₂ 板的角度,可以改变滤光片的中心波长和 SiO₂ 板的光路长度,实现准连续波长调谐.在全 L 波段实现超过 40 nm 波长调谐范围和小于 7.7 kHz 的线宽, C 波段实现超过 35 nm 的调谐范围和小于 8 kHz 的线宽,相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 低于 –130 dB/Hz.

2020年, 法国 iTEOX 公司的 Guillemot 等^[38] 开展了基于 GMRF 在 1506 nm 波段 ECDL 的研究. 该方案增益介质为一侧涂抗反射涂层的 FP 单条纹二极管, 另一侧为激光输出端, 选用球面透镜准 直光束, 粘在 PZT 上的 GMRF 既用作滤波原件, 也是谐振端面. 通过微调谐振腔的长度, 频率调谐范 围为 14 GHz, 且无模式跳变, 与谐振器的预期自由光谱范围 20 GHz 基本一致. 激光器线宽为 366 kHz.

2020年,俄罗斯斯特尔马克波利乌斯研究所^[30]报道了一种了以双 AOTF 为选频组件的 ECDL 的研究.该激光器在 3 mW 输出功率下,调谐范围为 60 nm (815~875 nm).稳态激光发射谱线宽可达 25 MHz. 扫描模式下, AOTF 的最高调谐速率 104 nm·s⁻¹ 下,线宽为 0.022 nm (8.8 GHz).

Filter-ECDL 的激光增益芯片除边发射半导体激光器外,还可选用垂直外腔表面发射激光器 (vertical external cavity surface emitting laser, VECSEL). 这种激光器的本身特性决定,增益介质一般需要 外部光源泵浦,其谐振腔也多为外腔结构^[88].并且,该类激光器的外腔选模元件也多为 BRF 和 FP 标准具. 2017 年,波兰电子技术研究所的 Broda 等^[83] 报道了双模式谐振微腔的光泵浦 VECSEL 的 宽调谐性. 该激光器采用 V 型腔结构, VECSEL 增益芯片被光泵浦后,输出光照射到高反射镜上,再 以 V 型反射到 BRF,最后经输出耦合镜出光. 波长调谐功能是通过旋转 BRF 实现的,并且通过控制 谐振腔中的高反射率反射镜,利用泵浦功率和热提取控制有源区温度,实现了激光中心波长为 985 nm 的 95 nm 波长调谐范围,输出功率为 5~95 mW.

2020年,该团队^[33]又开展了 1600 nm 以上薄膜外腔表面发射激光器 (membrane external cavity surface emitting lasers, MECSEL) 的研究. 该激光器不同于 V 型结构,谐振腔由两个介质镜组成,旋转 BRF 产生了从 1695~1828 nm 的 133 nm 波长调谐范围.

2021年,美国新墨西哥大学 (University of New Mexico)的 Priante 等^[89]对井内泵浦的 MECSEL 的可调谐性与线宽展开了研究.通过调节 BRF, 该激光器的波长调谐范围从 1124~1195 nm (71 nm),线宽为 1.7 nm.并且由于采用 4f 多程泵浦架构, MECSEL 输出功率达到 28.5 W.

基于高 Q 回音壁模式谐振器 (whispering-gallery-mode resonator, WGMR) 激光器的出现极大程 度地优化了超窄线宽半导体激光器的性能^[90]. 2020 年, 美国的 OEwaves 公司^[91] 报道了一种具有 Hz 级瞬时线宽的 780 nm 自注入锁定 ECDL. 激光增益芯片发射激光, 通过棱镜耦合进由机械抛光结晶氟 化镁 (MgF₂) 制成的 WGMR 中, 来自 WGMR 的共振瑞利背向散射光自注入锁定激光增益芯片并稳 定激光器, 调谐方式是通过压电致动器在 WGMR 上施加外部应力. 该方法可使激光线宽提高 40 dB, 瞬时线宽达 5 Hz, RIN 降低 10 dB, 调谐范围 12.8 GHz, 输出功率 4.6 mW.

目前该方向也已经有了相关的应用研究,例如应用于原子钟和放射性同位素检测、OCT 扫频光 源等^[84].中国科学院国家授时中心开发了一种紧凑、高度稳定的 698 nm 滤波器型外腔可调谐窄线宽 半导体激光器,专门应用于空间锶 Sr 光学时钟^[35].日本东京大学 (The University of Tokyo) 使用窄 带宽干涉滤波器 ECDL 开发用于具有高同位素选择性的锶 Sr 共振电离光谱,可应用于海洋样品中放 射性 Sr-90 的无背景分析 (background-free analysis)^[92].

3.2 波导型 ECDL

MRR-ECDL 具有成本低、功耗低、集成度高、尺寸小等优点,并且其线宽特性较好,可较容易达到 几十 kHz. 随着新一代 MRR-ECDL 的发展,线宽己可以达到百 Hz 量级.光波导损耗低,具有良好的 滤波特性,产生高 SMSR.从单环结构到双环结构时,通过使用双环游标效应可将调谐范围扩大至几十 nm,而新一代 MRR-ECDL 的单个激光器波长调谐范围已可达百 nm 以上.但波导与增益芯片的耦合 损耗仍较高,限制了激光输出功率的提高.目前,美国加州大学圣塔芭芭分校 (University of California, Santa Barbara, UCSB)^[93]、日本 NEC 公司^[41]、中国科学院半导体研究所^[42]、美国哥伦比亚大学 (Columbia University)^[43]、芬兰坦佩雷大学^[19]、爱尔兰都柏林城市大学 (Dublin City University)^[40,44] 等研究机构均开展了 MRR-ECDL 的研究.

早在 20 世纪 90 年代, 就有研究人员对 MRR 的特性进行了深入探究^[94], 20 余年间, 基于 MRR 的半导体激光器飞速发展, 衍生出了各种不同的波导材料、结构等.单个 MRR 的光谱输出仅为梳状 谱, 很难将其单独作为波长调谐的滤波器件使用, 因此往往将它与其他可以实现调谐功能的元件进行 混合集成, 实现波长调谐的功能. 2011 年, 韩国电子通信研究所^[95] 报道了基于聚合物布拉格反射器 (polymer Bragg reflector, PBR) 和单个 MRR 的 ECDL 的研究. 该激光器的谐振腔由 PBR、增益芯片、单个 MRR 构成, 通过 PBR 的高热光效应进行波长调谐控制, 结合作为梳状反射器的环形谐振腔的预 定模间距进行离散调谐,当 PBR 的反射波长与 MRR 的某一反馈波长叠加一致时, 单模振荡激射.该激光器在 1550 nm 波段调谐范围为 14.5 nm, 离散步长 0.8 nm, 输出功率最高 0.6 mW. 但单个 MRR 在提升 ECDL 的某些其他重要特性上也会有突出的表现. 2021 年, UCSB 将超高 Q 值 SiN 波导上的 单个 MRR 与激光器集成, 利用 MRR 的外腔反馈, 可以实现 3 Hz 的洛伦兹 (Lorentz) 线宽 ^[96].

伴随着半导体加工工艺的日益成熟和成本的降低,为了进一步提高激光器的整体性能,满足光通 信发展的需求,双 MRR型 ECDL 越来越受到研究人员的关注.除了传统圆环形状的微环外,还有部 分研究人员采用了方形微环方案^[97].2009年,日本 NEC 公司的 Chu等^[41]研究人员首次提出采用硅 光子技术制作可调谐 ECDL.该研究采用 InP 基的 SOA 作为增益芯片,与 SOI 衬底上制作的双 MRR 进行外腔耦合.通过双 MRR 的热光效应和游标效应实现波长调谐功能,在 C 或 L 波段达到了 38 nm 的波长调谐范围,调谐功耗为 26 mW.该激光器与采用传统 SiON 波导相比,尺寸缩小至 1/25、功耗 降低至 1/8^[98,99].

2018年,美国哥伦比亚大学的 Guan 等^[43]研究人员开展了用于相干通信的宽调谐窄线宽 III-V/硅基混合 ECDL 的研究. 该研究使用 InP 基 RSOA 为增益芯片,利用光点尺寸转换器 (spot size converter, SSC) 与硅基 MRR 形成的外腔耦合. 该激光器的波长调谐功能是通过双微环游标结构和 Y 型结连接组成的波长选择反射器实现,实验结果显示在以 1550 nm 为中心波长,调谐范围超过 60 nm, 最大输出功率为 11 mW, SMSR 可达 55 dB,线宽为 37 kHz.

与 Si 基波导相比, Si₃N₄ 波导具有折射率差大、透明度范围大、线性传播损耗小、非线性效应小等优点, 利于线宽特性的提高. 2018 年, 爱尔兰都柏林城市大学的 Lin 等^[44] 开展了基于 Si₃N₄ 波导 MRR 的 InP-TriPleX 混合光子集成可调谐激光器的研究. 该激光器外腔 Si₃N₄ 波导平台由两个级联 的 MRR 组成, 其半径略有不同, 利用游标效应实现波长调谐. 该器件的相位段可以实现波长的微调, 功率调谐段可以优化输出功率. 相位段、MRR、功率调谐段均通过温度控制. 实验结果显示, 该激光器 在 1550 nm 波段实现了约 50 nm 的调谐范围, 输出功率为 10 dBm, SMSR 超过 50 dB, 整个调谐范围 线宽小于 80 kHz, 最窄线宽为 35 kHz.

2021年,该单位^[40]又开展了基于 InP-Si₃N₄集成的双可调谐模块研究.该研究以 InP 基反射式 SOA 为增益芯片,与相位部分、MZI 可调谐耦合器和游标结构的双 Si₃N₄基 MRR 耦合成 ECDL,其 中相位部分、MZI 可调谐耦合器和 MRR 都可进行热光控制.通过双激光器串联可提供两个波长,每一个都可以提供 70 nm 的调谐范围,实现了从 1470~1575 nm 覆盖整个 C 和部分 S 波段超过 100 nm 的调谐范围, RIN 为 –165 dB/Hz.

为了使 MRR-ECDL 能够工作在中红外波段, 2018 年, 比利时根特大学 (Ghent University) Radosavljevic 等^[100] 在 Ge-on-SOI 波导平台上制作了可热调谐的游标双 MRR 结构, 通过与激光增益芯 片耦合, 实现了在 5 μm 波段的 108 nm 波长调谐范围.

除上述在增益芯片一侧与 MRR 波导耦合的谐振腔结构外,还有研究人员^[101]通过异质集成,在 增益芯片两侧各集成一个双 MRR 作谐振腔,波长调谐是通过热调谐 MRR 下方的波导实现的. 该激 光器粗调谐范围为 29 nm,线宽 160 kHz, SMSR 超过 40 dB,输出功率 15 mW.

现如今,新型集成相干可调谐激光器为 MRR-ECDL 提供了新思路,这种新型波导外腔结构使用 超低损耗波导制作 3 个或以上大直径 MRR^[102],避免了双环游标效应中,小尺寸微环^[103~106]所带 来的损耗增加^[107],有效提升了激光器的波长调谐范围、线宽特性和噪声特性^[108].这种新一代的 MRR-ECDL,波长调谐范围可达百 nm 以上,线宽提升到百 Hz 水平^[93].

2021 年, 美国 Morton Photon 公司和 UCSB^[108] 合作研究了一种新型相干可调谐激光器. 该激光器是基于 CMOS 的硅光子学平台设计和制造的, 利用 III-V 材料的异质集成作增益部分与外腔波导耦合, 包括相位控制部分、可调谐耦合器, 以及 Si 基波导中的 3 个具有较大环形尺寸的超低损耗 MRR. 谐振腔为增益芯片左侧的可调谐反射器端和右侧的 MRR 端, 并且输出端可以是可调谐反射器端, 或者能滤除自发辐射噪声的影响的可调谐耦合器端. 通过对 MRR 的温度控制, 该激光器实现了 118 nm 波长调谐范围, 覆盖 S, C 和 L 波段, 洛伦兹线宽小于 100 Hz, RIN 小于 –155 dBc/Hz, 最大片上光功

率为 15 mW.

MRR-ECDL 常用在光通信领域, 例如微波通信中的微波发生器^[109]、密集波分复用系统 (dense wavelength division multiplexing, DWDM) 和 DC 收发器中的光源部分^[40] 以及相干光传输^[43,44] 等.

除上述 MRR 波导结构外, 研究人员还对其他波导外腔结构半导体激光器的波长调谐和线宽特性 做了相关研究. 2010 年, 韩国釜山大学 (Pusan National University) 的 Kim 等^[110] 以柔性聚合物布拉 格反射器为外腔, 通过施加应变直接调谐布拉格波长, 实现了从 1495~1575 nm 的 80 nm 波长调谐范 围.

2019 年, UCSB 的 Xiang 等^[111] 基于外部扩展 Si₃N₄ 布拉格光栅和半导体增益芯片组成了超窄 线宽固定波长混合激光器, 激光输出功率 24 mW, 洛伦兹线宽 320 Hz, 单波长 1544 nm.

2020年,韩国釜山大学 Park 等^[112] 开展了基于聚合物光波导的可调谐布拉格光栅滤波器的研 究,可实现 ECDL 的波长调谐功能.聚合物波导采用两级级联倾斜布拉格光栅和非对称 Y 分支波导 结构,通过聚合物波导的高热光效应和强温度限制,波导光栅具有较大的折射率可调性,波长调谐范 围在 1520 nm 波段达到 12 nm, SMSR 超过 35 dB,相邻信道串扰 –25 dB.

2021年, CIOMP的Luo等^[113]开展了C波段高线性偏振窄线宽混合半导体激光器的研究. 该激光器由半导体增益芯片和外腔高双折射波导布拉格光栅组成. 经实验测得, 该激光器 SMSR 达到 50.2 dB, 线宽为 4.15 kHz, 最大输出功率 8.07 mW.

3.3 光纤型 ECDL

FBG-ECDL 最突出的特点是其优异的线宽特性,可较容易地达到几 kHz,甚至 1 kHz 以下.但因其调谐方式受限,波长调谐范围很小,一般仅有几 nm.此外 FBG-ECDL 还具有结构简单、低噪声输出、体积小、成本低、稳定性好、成本低等优点.为了进一步提升 FBG-ECDL 的性能,研究人员又引入了环形光纤外腔的结构.目前,CIOMP^[114]、中国科学院上海光学精密机械研究所 (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, SIOM)^[115]、瑞典皇家理工学院 (KTH Royal Institute of Technology)^[116]、法国雷恩大学 (University of Rennes)^[117]等众多机构对其 开展了研究.

20世纪 80 年代,对用于激光器模式选择和线宽压窄的光纤布拉格反射器就有了相关报道^[118], 经过 30 余年的发展,研究人员在该领域做出了大量的改进和提升.为了同时实现 FBG-ECDL 的 高输出功率和窄线宽,研究人员对激光器的增益介质做出了扩展.2011 年,美国麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology)的 Loh 等^[119] 报道了一种 1550 nm 波段高功率、窄线宽的封装 ECDL. 该激光器通过透镜光纤,将一个双通道弯曲沟道平板耦合光波导放大器 (slab-coupled optical waveguide amplifier, SCOWA)和一个 FBG 耦合. SCOWA 增益介质具有低光约束、大模式尺寸、低 光损耗和低噪声的优点. 该激光器的洛伦兹线宽为 1 kHz, RIN 小于 –160 dB/Hz,输出功率达到 370 mW.

CIOMP 对 FBG-ECDL 也开展了较多的研究, 2018 年^[114], 他们对光纤光栅自注入锁定的窄线宽 外腔半导体激光器做了相关报道, 该蝶形封装激光器在 1550 nm 波段最小洛伦兹线宽小于 1 kHz, 最 大输出功率可达 12 mW, SMSR 超过 50 dB. 2021 年, 法国雷恩大学的 Congar 等^[117] 开展了基于外 腔 FBG 的窄线宽近紫外 InGaN 激光器的研究. 该激光器输出功率 1.3 mW, SMSR 为 44 dB, 本征线 宽可达 16 kHz.

研究人员在 FBG-ECDL 的波长调谐特性方面也做了大量研究. 2014 年, 俄罗斯 NOLATECH 公司的 Duraev 等^[120] 报道了一种基于单模 FBG 的外腔型单频可调谐半导体激光器. 实验证明, 通过

改变注入电流、激光器有源区的温度,以及光纤光栅的温度可以实现波长调谐功能.该研究中,激光器 调谐范围为 1.5 nm,调谐步长小于 0.02 nm,输出功率可达 10 mW,线宽 10 kHz. 2017 年, SIOM 的 Zhang 等^[115] 开展了 1550 nm 波段热调谐窄线宽 FBG-ECDL 的研究. 该激光器具有 35 kHz 线宽和 65 pm/°C (8.125 GHz/°C) 的线性调谐速度,连续无模式跳变调谐范围为 0.5 nm.

研究人员为了进一步抑制高频率下的相位/频率噪声、压窄线宽,采用了全光纤结构的环形外腔,可以有效扩展腔长. 2016 年, SIOM 的 Wei 等 ^[121] 报道了采用光纤布拉格光栅 FP 腔自注入锁定技术的窄线宽 DFB-ECDL. 通过将 FBG-FP 腔透射光通过保偏光栅注入 DFB 激光器,进行共振光反馈.利用该技术,系统在 5 Hz~1 kHz 的 Fourier 频率下,可实现超过 70 dB 的噪声抑制. 此外,它保持白噪声平台低至 40 Hz²/Hz,高于 1 kHz 的 Fourier 频率,具有 125 Hz 的固有洛伦兹线宽, RIN 在 2 MHz 以上小于 –142 dBc/Hz. 通过 DFB 温度和注入电流调谐,实现 0.8 nm 的准连续调谐.

此外,还有研究人员通过光纤环形腔实现波长调谐的功能. 2020 年,长江大学的 Gao 等 ^[122]利用光纤光栅和 DFB 激光器的温度进行波长调谐. 当光纤光栅工作在 40°C, DFB 在 10°C 时,输出 1550.32 和 1552.40 nm 的双波长激光,波长间隔 2.08 nm. 二者的工作温差从 30°C 变到 0°C 时,波长间隔可从 2.08 调节到 5.34 nm,实现波长调谐. 次年,该研究团队 ^[123]采用双 DFB 激光器和光纤光 栅研制了三波长激光器,实验结果显示在 1549.53, 1551.15 和 1553.94 nm 获得稳定的三波长激光输出,并通过调节温度,获得了 2.79~5.60 nm 的可调谐波长间隔.

2019年, 瑞典皇家理工学院的 Lindberg 等^[116]利用啁啾光纤布拉格光栅 (chirp fiber Bragg grating, CFBG)和 SOA 构成了激光器,使用具有可变延迟的脉冲对驱动 SOA,通过使用循环脉冲瞄准 CFBG 中的不同区域来实现波长调谐. 实现了激光输出在 1550 nm 波段调谐范围达 40 nm,调谐分辨率为 3.3 pm,功率变化 1.46 dB,线宽小于 30 pm. 2020年,该单位 ^[124]又以 SOA 为增益介质和调制器, CFBG 为谐振腔两端反射器,构建 C 型腔,在 1550 nm 波段实现了 35 nm 的调谐范围.虽然实现了 FBG-ECDL 波长调谐范围的增大,但线宽特性也受到了显著的影响.此外,环形光纤外腔结构往往需要很长的长度,极大影响了器件的体积.

目前, FBG-ECDL 的制备工艺已较为成熟, 可广泛应用于分布式光纤传感领域^[125]、相干光谱分析^[115]、合成孔径雷达^[126]等领域.

4 总结

ECDL 可以很好地满足现如今激光雷达、光通信系统、光谱分析、原子钟计时等应用以及将来的通信技术^[127]对激光光源的宽波长调谐范围以及窄线宽特性的要求.本文阐述了宽调谐窄线宽型 ECDL 的原理,回顾了近年来该领域的研究成果.分立器件型 ECDL 优势在于较宽的波长调谐范围.其中,Littrow 结构比 Littman 具有更宽的调谐范围,且输出功率较大,而 Littman 具有更窄的线宽特性.滤波器型外腔结构种类较多,性能与所选用的滤波器密切相关,发展自由度较高.此外,分立器件 型 ECDL 由于分立元件较多,总体结构尺寸不易缩小.因此,分立器件型 ECDL 适用于对集成度和器 件尺寸要求不高,但对波长调谐范围和光谱分辨率较高的领域.例如气体光谱检测、测量校准、生物医学检测、原子钟计时等.波导型 ECDL 易于集成、体积小、成本低,整体线宽特性良好,适用于相干光 通信、光传感等领域.其中,微环型外腔结构的调谐范围和线宽特性比较均衡,适用于光子集成领域,具有广阔的应用前景.光纤型 ECDL 的线宽特性突出,但调谐范围有限,适用于调谐要求不高的高精度时频传递、光纤传感等领域.

在信息时代,相干光通信和车载激光雷达等领域的高速发展对激光光源的宽调谐范围和窄线宽特性提出了更高的要求.同时,系统的集成度、体积、可靠性也是宽调谐窄线宽 ECDL 在发展过程中面临的严峻挑战.

目前,集成度高、性能较均衡的 MRR-ECDL 具有广阔的应用前景,通过优化光波导的材料、结构, 提高光波导与增益芯片的耦合效率可以使得整体性能进一步提高.分立器件型 ECDL 则应当继续寻 求在保证波长调谐范围和输出功率的同时如何更容易获得更窄的线宽,并且探究如何减小系统尺寸, 降低光路耦合对准难度.此外,Filter-ECDL 由于具有极高的自由度,通过探寻新型滤波器件和结构,不 管是在性能提升还是器件尺寸等方面都具有极大的发展潜力.当前针对 ECDL 调谐速度的研究较少, 但随着应用需求提高,调谐速度也会成为一个重要的性能参数,通过改进调谐方式,如在 MRR-ECDL 中寻求替代热调谐的方式,可进一步提高 ECDL 的调谐速率.值得注意的是,稳定性和可靠性也是制 约 ECDL 发展的重要问题.通过减少分立元件、用激光焊接代替 UV 胶固定,以及优化封装结构等途 径可以提高激光器的稳定性和可靠性,进一步扩大其应用范围,促进技术的发展.

参考文献

- 1 Cheng Q, Bahadori M, Glick M, et al. Recent advances in optical technologies for data centers: a review. Optica, 2018, 5: 1354–1370
- 2 Olsson S L I, Cho J, Chandrasekhar S, et al. Probabilistically shaped PDM 4096-QAM transmission over up to 200 km of fiber using standard intradyne detection. Opt Express, 2018, 26: 4522
- 3 Lu B, Wei F, Zhang Z, et al. Research on tunable local laser used in ground-to-satellite coherent laser communication. Chin Opt Lett, 2015, 13: 091402
- 4 Yang Q F, Shen B, Wang H, et al. Vernier spectrometer using counterpropagating soliton microcombs. Science, 2019, 363: 965–968
- 5 Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2019, 25: 1–8
- 6 Lang X K, Jia P, Chen Y Y, et al. Advances in narrow linewidth diode lasers. Sci China Inf Sci, 2019, 62: 061401
- 7 Gasmi K, Al-Jalal A, Al-Basheer W, et al. Blue external-cavity diode laser for NO₂ gas detection. In: Proceedings of Semiconductor Lasers and Laser Dynamics IX, Electr Network, 2020. 1135616
- 8 Zhao Q L, Zhang Z T, Wu B, et al. Noise-sidebands-free and ultra-low-RIN 15 μm single-frequency fiber laser towards coherent optical detection. Photon Res, 2018, 6: 326–331
- 9 Wu W R, Chen M, Zhang Z, et al. Overview of deep space laser communication. Sci China Inf Sci, 2018, 61: 040301
- 10 Grafen M, Delbeck S, Busch H, et al. Evaluation and benchmarking of an EC-QCL-based mid-infrared spectrometer for monitoring metabolic blood parameters in critical care units. In: Proceedings of Optical Diagnostics and Sensing XVIII: Toward Point-of-Care Diagnostics, San Francisco, 2018
- 11 Newman Z L, Maurice V, Drake T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock. Optica, 2019, 6: 680–685
- 12 Hjelme D, Mickelson A. On the theory of external cavity operated single-mode semiconductor lasers. IEEE J Quantum Electron, 1987, 23: 1000–1004
- 13 Kakiuchida H, Ohtsubo J. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30: 2087–2097
- 14 Ghafouri-Shiraz H, Lo B S K. Distributed Feedback Laser Diodes: Principles and Physical Modelling. New Jersey: John Wiley & Sons, 1997
- 15 Kotaki Y, Ishikawa H. Wavelength tunable DFB and DBR lasers for coherent optical fibre communications. IEE Proc J Optoelectron UK, 1991, 138: 171–177
- 16 Luo C C, Zhang R Y, Qiu B C, et al. Waveguide external cavity narrow linewidth semiconductor lasers. J Semicond, 2021, 42: 041308
- 17 Wang Y, Zhou Y L, Wu H, et al. A tunable external cavity laser operating at excited states of bimodal-sized quantum-dot. Jpn J Appl Phys, 2019, 58: 051013

- 18 Podoskin A, Golovin V, Gavrina P, et al. Ultrabroad tuning range (100 nm) of external-cavity continuous-wave high-power semiconductor lasers based on a single InGaAs quantum well. Appl Opt, 2019, 58: 9089–9093
- 19 Ojanen S P, Viheriälä J, Cherchi M, et al. GaSb diode lasers tunable around 2.6 μm using silicon photonics resonators or external diffractive gratings. Appl Phys Lett, 2020, 116: 081105
- 20 Shirazi M F, Kim P, Jeon M, et al. Free space broad-bandwidth tunable laser diode based on Littman configuration for 3D profile measurement. Opt Laser Tech, 2018, 101: 462–467
- 21 Kapasi D P, Eichholz J, McRae T, et al. Tunable narrow-linewidth laser at 2 μm wavelength for gravitational wave detector research. Opt Express, 2020, 28: 3280–3288
- 22 de Labachelerie M, Sasada H, Passedat G. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned. Appl Opt, 1994, 33: 3817–3819
- 23 Long R, Wang H L, Gong Q, et al. Optical feedback of semiconductor external cavity laser. Commun Technol, 2013, 46: 142-144 [龙睿, 王海龙, 龚谦, 等. 基于半导体外腔激光器的光反馈研究. 通信技术, 2013, 46: 142-144]
- 24 Duarte F J. Tunable Lasers Handbook. San Diego: Academic Press, 1995
- 25 Zhou P, Wu Y Q, Zhang R Z. Effect of collimating lens misalignment on linewidth of Littman-Metcalf grating external cavity laser. Infrared Laser Eng, 2022, 51: 188–195 [周平, 吴永前, 张蓉竹. 准直透镜失调对 Littman-Metcalf 光栅 外腔激光器线宽的影响. 红外与激光工程, 2022, 51: 188–195]
- 26 Sun H, Menhart S, Adams A. Calculation of spectral linewidth reduction of external-cavity strong-feedback semiconductor lasers. Appl Opt, 1994, 33: 4771–4775
- 27 Loh H Q, Lin Y J, Teper I, et al. Influence of grating parameters on the linewidths of external-cavity diode lasers. Appl Opt, 2006, 45: 9191–9197
- 28 Zhang X M, Wang N, Gao L, et al. Narrow-linewidth external-cavity tunable lasers. In: Proceedings of International Conference on Optical Communications & Networks, Guangzhou, 2011
- 29 Gambell A, Simakov N, Ganija M, et al. Intra-cavity semiconductor laser tuning using a frequency compensating acousto-optic tunable filter pair. In: Proceedings of AOS Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT) and Australian Conference on Optics, Lasers, and Spectroscopy (ACOLS) 2019, Melbourne, 2019
- 30 Magdich L N, Chamorovskiy A Y, Shidlovsky V R, et al. Tunable semiconductor laser with two acousto-optic tunable filters in its external cavity. Quantum Electron, 2020, 50: 136–140
- 31 Ménager L, Cabaret L, Lorgeré I, et al. Diode laser extended cavity for broad-range fast ramping. Opt Lett, 2000, 25: 1246–1248
- 32 Alfieri C G E, Waldburger D, Nürnberg J, et al. Mode-locking instabilities for high-gain semiconductor disk lasers based on active submonolayer quantum dots. Phys Rev Appl, 2018, 10: 044015
- 33 Broda A, Jezewski B, Sankowska I, et al. SWIR MECSEL emitting above 1600 nm. In: Proceedings of Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) X, 2020. 11263
- 34 Pan G Z, Guan B L, Xu C, et al. Broad bandwidth interference filter-stabilized external cavity diode laser with narrow linewidth below 100 kHz. Chin Phys B, 2018, 27: 014204
- 35 Zhang L B, Liu T, Chen L, et al. Development of an interference filter-stabilized external-cavity diode laser for space applications. Photonics, 2020, 7: 12
- 36 Gu Y, Hu G Q, Wu X P, et al. Wavelength control technology for F-P cavity-based MEMS TOF. Study Opt Commun, 2009, 6: 45–47
- 37 Xiao X, Yu F Q. A novel wavelength tuning method in external cavity diode laser with all-dielectric thin film fabryperot filte. In: Proceedings of Photonics & Optoelectronic, Chengdu, 2010
- 38 Guillemot L, Oksenhendler T, Pelloquin S, et al. Guided-mode resonance filter extended-cavity diode laser. Laser Phys, 2020, 30: 035802
- 39 Mizutani K, de Merlier J, Sudo S, et al. Liquid crystal mirror-based wavelength-tunable laser module with asynchronous mode cavity. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18: 1299–1301
- 40 Dass D, Costas M T, Barry L P, et al. 28 GBd PAM-8 transmission over a 100 nm range using an InP-Si₃N₄ based integrated dual tunable laser module. Opt Express, 2021, 29: 16563–16571
- 41 Chu T, Fujioka N, Ishizaka M. Compact, lower-power-consumption wavelength tunable laser fabricated with silicon photonic-wire waveguide micro-ring resonators. Opt Express, 2009, 17: 14063–14068
- 42 Zhou Z, Yuan X, Gu M, et al. Design of double-ring resonator for tunable lasers on silicon. In: Proceedings of Optoelectronics and Micro/Nano-Optics, Beijing, 2017

- 43 Guan H, Novack A, Galfsky T, et al. Widely-tunable, narrow-linewidth III-V/silicon hybrid external-cavity laser for coherent communication. Opt Express, 2018, 26: 7920–7933
- 44 Lin Y, Fan Y, Boller K J, et al. Characterization of hybrid InP-TriPleX photonic integrated tunable lasers based on silicon nitride (Si₃N₄/SiO₂) microring resonators for optical coherent system. IEEE Photonics J, 2018, 10: 1–8
- 45 Wang Y, Luo S, Ji H M, et al. Continuous-wave operation of InAs/InP quantum dot tunable external-cavity laser grown by metal-organic chemical vapor deposition. Chin Phys B, 2021, 30: 018106
- 46 Jiang Y F, Vijayraghavan K, Jung S, et al. External cavity terahertz quantum cascade laser sources based on intra-cavity frequency mixing with 1.2–5.9 THz tuning range. J Opt, 2014, 16: 094002
- 47 Vizbaras K, Dvinelis E, Šimonyte I, et al. High power continuous-wave GaSb-based superluminescent diodes as gain chips for widely tunable laser spectroscopy in the 1.95–2.45 μm wavelength range. Appl Phys Lett, 2015, 107: 011103
- 48 Fedorova K A, Gorodetsky A, Rafailov E U. Compact all-quantum-dot-based tunable THz laser source. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2017, 23: 1–5
- 49 Hard T. Laser wavelength selector and output coupler. IEEE J Quantum Electron, 1969, 5: 321
- 50 Chen M H, Hsiao S C, Shen K T, et al. Single longitudinal mode external cavity blue InGaN diode laser. Opt Laser Tech, 2019, 116: 68–71
- 51 Shimada Y, Chida Y, Ohtsubo N, et al. A simplified 461-nm laser system using blue laser diodes and a hollow cathode lamp for laser cooling of Sr. Rev Sci Instrum, 2013, 84: 063101
- 52 Ruhnke N, Müller A, Eppich B, et al. 400 mW external cavity diode laser with narrowband emission at 445 nm. Opt Lett, 2014, 39: 3794–3797
- 53 Chi M, Jensen O B, Petersen P M. Tuning range and output power optimization of an external-cavity GaN diode laser at 455 nm. Appl Opt, 2016, 55: 2263
- 54 Tsai T, Wysocki G. External-cavity quantum cascade lasers with fast wavelength scanning. Appl Phys B, 2010, 100: 243–251
- 55 Chi M J, Jensen O B, Petersen P M. High-power dual-wavelength external-cavity diode laser based on tapered amplifier with tunable terahertz frequency difference. Opt Lett, 2011, 36: 2626–2628
- 56 Stry S, Zediker M S, Hildebrandt L, et al. Compact tunable diode laser with diffraction-limited 1 Watt for atom cooling and trapping. In: Proceedings of Conference on High-Power Diode Laser Technology and Applications II, San Jose, 2004. 17–25
- 57 Giraud E, Demolon P, Gresch T, et al. Room-temperature continuous-wave external cavity interband cascade laser tunable from 3.2 to 3.6 μm. Opt Express, 2021, 29: 38291–38297
- 58 Kruczek T, Fedorova K A, Sokolovskii G S, et al. InAs/AlSb widely tunable external cavity quantum cascade laser around 3.2 μm. Appl Phys Lett, 2013, 102: 011124
- 59 Okamura H. Shift lens external-cavity diode laser for broad wavelength tuning and switching. Opt Lett, 2010, 35: 1175–1177
- 60 Ding D, Lv X Q, Chen X Y, et al. Tunable high-power blue external cavity semiconductor laser. Opt Laser Tech, 2017, 94: 1–5
- 61 He K, Wang J P, Hou Y Q, et al. High-spectral-resolution characterization of broadband high-efficiency reflection gratings. Appl Opt, 2013, 52: 653–658
- 62 Al-Jalali S, El-Daher M S. Detection of multi absorption lines for CH₄ using broadband laser beam modulation. J Opt, 2018, 47: 22–27
- 63 Takei Y, Arai K, Yoshida H, et al. Development of an optical pressure measurement system using an external cavity diode laser with a wide tunable frequency range. Measurement, 2020, 151: 107090
- 64 Masui S, Goda S, Kadoya S, et al. Grating periods measurement of multi-pitched grating using Littrow configuration external cavity diode laser. Appl Phys Express, 2021, 14: 076501
- 65 Lv Q, Liu Z W, Wang W, et al. Simple and compact grating-based heterodyne interferometer with the Littrow configuration for high-accuracy and long-range measurement of two-dimensional displacement. Appl Opt, 2018, 57: 9455–9463
- 66 Luo W, Duan C X. A broadband pulsed external-cavity quantum cascade laser operating near 6.9 μm. Chin Phys Lett, 2016, 33: 024207
- 67 Jiménez A, Milde T, Staacke N, et al. Narrow-line external cavity diode laser micro-packaging in the NIR and MIR spectral range. Appl Phys B, 2017, 123: 207

- 68 Chichkov N B, Yadav A, Zherebtsov E, et al. Wavelength-tunable, GaSb-based, cascaded type-I quantum-well laser emitting over a range of 300 nm. IEEE Photon Technol Lett, 2018, 30: 1941–1943
- 69 Hoppe M, Rohling H, Schmidtmann S, et al. New wide tunable external cavity interband cascade laser based on a micro-electro-mechanical system device. In: Proceedings of Conference on MOEMS and Miniaturized Systems XVIII, San Francisco, 2019
- 70 Littman M G, Metcalf H J. Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander. Appl Opt, 1978, 17: 2224– 2227
- 71 Fuh C N, Chen H C, Liang C P, et al. A tunable diode laser. In: Proceedings of Instrumentation & Measurement Technology Conference, Hamamatsu, 1994. 1089–1090
- 72 Stry S, Thelen S, Sacher J, et al. Widely tunable diffraction limited 1000 mW external cavity diode laser in Littman/Metcalf configuration for cavity ring-down spectroscopy. Appl Phys B, 2006, 85: 365–374
- 73 Wang W B, Major A, Paliwal J. Grating-stabilized external cavity diode lasers for raman spectroscopy a review. Appl Spectr Rev, 2012, 47: 116–143
- 74 Wu X J, Wei H Y, Zhang H Y, et al. Absolute distance measurement using frequency-sweeping heterodyne interferometer calibrated by an optical frequency comb. Appl Opt, 2013, 52: 2042
- 75 Cabral A P. Calibration of the Fabry-Pérot free spectral range using a tunable laser in a Michelson interferometer. Opt Eng, 2006, 45: 100501
- 76 Gong H, Liu Z G, Zhou Y L, et al. Extending the mode-hop-free tuning range of an external-cavity diode laser by synchronous tuning with mode matching. Appl Opt, 2014, 53: 7878–7884
- 77 Saliba S D, Junker M, Turner L D, et al. Mode stability of external cavity diode lasers. Appl Opt, 2009, 48: 6692
- 78 Breguet J M, Henein S, Kjelberg I, et al. Tunable extended-cavity diode laser based on a novel flexure-mechanism. Int J Optomechatron, 2013, 7: 181–192
- 79 Starovoitov V S, Kischkat J F, Semtsiv M P, et al. Intracavity photoacoustic sensing of water vapor with a continuously tunable external-cavity quantum-cascade laser operating near 5.5 μm. Opt Lett, 2016, 41: 4955–4958
- 80 Lee S W, Song H W, Jung M Y, et al. Wide tuning range wavelength-swept laser with a single SOA at 1020 nm for ultrahigh resolution Fourier-domain optical coherence tomography. Opt Express, 2011, 19: 21227
- 81 Sheng B, Chen G H, Huang Y S, et al. Measurement of grating groove density using multiple diffraction orders and one standard wavelength. Appl Opt, 2018, 57: 2514–2518
- 82 Bernacki B E, Phillips M C. Standoff hyperspectral imaging of explosives residues using broadly tunable external cavity quantum cascade laser illumination. In: Proceedings of Conference on Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XI, Orlando, 2010
- 83 Broda A, Wojcik-Jedlinska A, Sankowska I, et al. A 95-nm-wide tunable two-mode vertical external cavity surfaceemitting laser. IEEE Photon Technol Lett, 2017, 29: 2215–2218
- 84 Kuznetsov M, Atia W, Johnson B, et al. Compact ultrafast reflective fabry-perot tunable lasers for OCT imaging applications. In: Proceedings of Conference on Optical Coherence Tomography and Coherence Domain Optical Methods in Biomedicine XIV, San Francisco, 2010
- 85 Choi K, Menders J, Searcy P, et al. Optical feedback locking of a diode laser using a cesium Faraday filter. Opt Commun, 1993, 96: 240–244
- 86 Thompson D J, Scholten R E. Narrow linewidth tunable external cavity diode laser using wide bandwidth filter. Rev Sci Instrum, 2012, 83: 023107
- 88 Kuznetsov M. VECSEL semiconductor lasers: a path to high-power, quality beam and UV to IR wavelength by design. In: Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology. Weinheim: Wiley, 2010. 16–33
- 89 Priante D, Zhang M, Albrecht A R, et al. In-well pumping of a membrane external-cavity surface-emitting laser. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2022, 28: 1–7
- 90 Huang Y Z, Ma X W, Yang Y D, et al. Hybrid-cavity semiconductor lasers with a whispering-gallery cavity for controlling Q factor. Sci China Inf Sci, 2018, 61: 080401
- 91 Lai Y H, Eliyahu D, Ganji S, et al. 780 nm narrow-linewidth self-injection-locked WGM lasers. In: Proceedings of Conference on Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXII, San Francisco, 2020
- 92 Iwata Y, Cheon D, Miyabe M, et al. Development of an interference-filter-type external-cavity diode laser for

resonance ionization spectroscopy of strontium. Rev Sci Instrum, 2019, 90: 123002

- 93 Tran M A, Huang D N, Guo J, et al. Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2020, 26: 1–14
- 94 Hagness S C, Rafizadeh D, Ho S T, et al. FDTD microcavity simulations: design and experimental realization of waveguide-coupled single-mode ring and whispering-gallery-mode disk resonators. J Lightwave Technol, 1997, 15: 2154–2165
- 95 Yoon K H, Kwon O K, Kim K S, et al. Ring-resonator-integrated tunable external cavity laser employing EAM and SOA. Opt Express, 2011, 19: 25465–25470
- 96 Xiang C, Guo J, Jin W, et al. High-performance lasers for fully integrated silicon nitride photonics. Nat Commun, 2021, 12: 6650
- 97 Kim S H, Byun Y T, Kim D G, et al. Widely tunable coupled-ring reflector laser diode consisting of square ring resonators. J Opt Soc Korea, 2010, 14: 38–41
- 98 Takeuchi T, Takahashi M, Suzuki K, et al. Wavelength tunable laser with silica-waveguide ring resonators. IEICE Trans Electron, 2009, 92: 198–204
- 99 Ishizaka M, Yamazaki H. Wavelength tunable laser using silica double ring resonators. Electron Comm Jpn Pt II, 2006, 89: 34–41
- 100 Radosavljevic S, Beneitez N T, Katumba A, et al. Mid-infrared Vernier racetrack resonator tunable filter implemented on a germanium on SOI waveguide platform. Opt Mater Express, 2018, 8: 824–835
- 101 Srinivasan S, Davenport M, Komljenovic T, et al. Coupled-ring-resonator-mirror-based heterogeneous III-V silicon tunable laser. IEEE Photon J, 2015, 7: 1–8
- 102 Deki Y, Hatanaka T, Takahashi M, et al. Wide-wavelength tunable lasers with 100 GHz FSR ring resonators. Electron Lett, 2007, 43: 225–226
- 103 Segawa T, Matsuo S, Kakitsuka T, et al. Full C-band tuning operation of semiconductor double-ring resonator-coupled laser with low tuning current. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19: 1322–1324
- 104 Matsuo S, Segawa T. Microring-resonator-based widely tunable lasers. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15: 545–554
- 105 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. Laser Phys Lett, 2013, 10: 015804
- 106 Hulme J C, Doylend J K, Bowers J E. Widely tunable Vernier ring laser on hybrid silicon. Opt Express, 2013, 21: 19718
- 107 Xiang C, Jin W, Guo J, et al. Effects of nonlinear loss in high-Q Si ring resonators for narrow-linewidth III-V/Si heterogeneously integrated tunable lasers. Opt Express, 2020, 28: 19926
- 108 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 Lightwave Technol, 2022, 40: 1802–1809
- 109 Chao R L, Liang L, Shi J W, et al. Fully integrated photonic millimeter-wave tracking generators on the heterogeneous III-V/Si platform. IEEE Photon Technol Lett, 2018, 30: 919–922
- 110 Kim K J, Kim J W, Oh M C, et al. Flexible polymer waveguide tunable lasers. Opt Express, 2010, 18: 8392–8399
- 111 Xiang C, Morton P A, Bowers J E. Ultra-narrow linewidth laser based on a semiconductor gain chip and extended Si₃N₄ Bragg grating. Opt Lett, 2019, 44: 3825–3828
- 112 Park T H, Kim S M, Oh M C. Polymeric tunable wavelength filter with two-stage cascaded tilted Bragg gratings. Opt Express, 2020, 28: 10145–10152
- 113 Luo X C, Chen C, Ning Y Q, et al. High linear polarization, narrow linewidth hybrid semiconductor laser with an external birefringence waveguide Bragg grating. Opt Express, 2021, 29: 33109–33120
- 114 Du Y N. Narrow linewidth semiconductor laser based on fiber bragg grating self-injection locking. Dissertation for Master Degree. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018 [杜悦宁. 基于光纤光栅自注入锁定的窄线宽半导体激光器研究. 硕士学位论文. 长春: 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 2018]
- 115 Zhang L, Wei F, Sun G, et al. Thermal tunable narrow linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG. IEEE Photon Technol Lett, 2017, 29: 385–388
- 116 Yang X, Lindberg R, Margulis W, et al. Continuously tunable, narrow-linewidth laser based on a semiconductor optical amplifier and a linearly chirped fiber Bragg grating. Opt Express, 2019, 27: 14213–14220

- 117 Congar A, Gay M, Perin G, et al. Narrow linewidth near-UV InGaN laser diode based on external cavity fiber Bragg grating. Opt Lett, 2021, 46: 1077–1080
- 118 Brinkmeyer E, Brennecke W, Zurn M, et al. Fibre Bragg reflector for mode selection and line-narrowing of injection lasers. Electron Lett, 1986, 22: 134–135
- 119 Loh W, O'Donnell F J, Plant J J, et al. Packaged, high-power, narrow-linewidth slab-coupled optical waveguide external cavity laser (SCOWECL). IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23: 974–976
- 120 Duraev V P, Medvedev S V. Single-frequency tunable semiconductor lasers. Semiconductors, 2014, 48: 120–122
- 121 Wei F, Yang F, Zhang X, et al. Subkilohertz linewidth reduction of a DFB diode laser using self-injection locking with a fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity. Opt Express, 2016, 24: 17406–17415
- 122 Gao S, Luo M, Jing Z G, et al. A tunable dual-wavelength fiber ring-cavity laser based on a FBG and DFB laser injection. Optik, 2020, 203: 163961
- 123 Gao S, Jing Z G, Chen H Y. A stable triple-wavelength semiconductor optical amplifier ring-cavity laser with two seed DFB lasers and a fiber Bragg grating. Optik, 2021, 238: 166725
- 124 Lindberg R, Laurell F, Fröjdh K, et al. C-cavity fiber laser employing a chirped fiber Bragg grating for electrically gated wavelength tuning. Opt Express, 2020, 28: 9208–9215
- 125 Muller M S, Hoffmann L, Bodendorfer T, et al. Fiber-optic sensor interrogation based on a widely tunable monolithic laser diode. IEEE Trans Instrum Meas, 2010, 59: 696–703
- 126 Toet P M, Hagen R A J, Hakkesteegt H C, et al. Miniature and low cost fiber bragg grating interrogator for structural monitoring in nano-satellites. In: Proceedings of International Conference on Space Optics, 2014
- 127 You X H, Wang C X, Huang J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. Sci China Inf Sci, 2021, 64: 110301

Advances in wide-tuning and narrow-linewidth external-cavity diode lasers

Qiang CUI^{1,2}, Yuxin LEI^{1*}, Yongyi CHEN^{1*}, Dexiao ZHANG^{1,3}, Cheng QIU¹, Ye WANG^{1,4}, Lutai FAN^{1,2}, Yue SONG¹, Peng JIA¹, Lei LIANG¹, Yubing WANG¹, Li QIN¹, Yongqiang NING¹ & Lijun WANG^{1*}

1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

3. Jiguang Semiconductor Technology Co., Ltd., Changchun 130033, China;

4. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

* Corresponding author. E-mail: leiyuxin@ciomp.ac.cn, chenyy@ciomp.ac.cn, wanglj@ciomp.ac.cn

Abstract The external-cavity diode laser is advantageous in terms of low noise, high side-mode suppression ratio, high temperature stability, simple structure, and low cost, which has been the preferred scheme to realize wide-tuning and narrow-linewidth characteristics. Thus, it has been widely used in optical communication, lidar, environmental monitoring, spectral analysis, optical coherence tomography, and other frontier fields. Herein, we introduce the technical scheme and review the development status of wide-tuning and narrow-linewidth external-cavity diode lasers in detail. Primarily, the structure, working principles, and performance characteristics, key technologies, optical performance and application fields of state-of-the-art studies in recent years are discussed. Finally, the challenges and potential development prospects of wide-tuning and narrow-linewidth external-cavity diode lasers are analyzed.

Keywords wide tuning, narrow linewidth, external-cavity diode laser, semiconductor laser, Littrow, Littman