

# 可调谐外腔半导体激光器研究进展

张林玉, 李 轩, 罗 薇, 赵春洁, 邱美叶, 孔惠颖, 郑照轩, 孙康迅, 周金辉, 张 驰, 施钧策, 徐东昕, 乔忠良, 李 林, 曲 轶, 李再金\*

海南师范大学物理与电子工程学院, 半导体激光海南省国际联合研究中心, 海南省院士团队创新中心, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2023年10月9日; 录用日期: 2023年11月20日; 发布日期: 2023年11月28日

## 摘 要

可调谐外腔半导体激光器具有调谐范围宽、线宽窄、输出功率高、单模输出等优良特性, 在白光干涉测量技术、波分复用系统、相干光通信、光纤传感等领域有着广泛的应用。本文首先介绍了可调谐外腔半导体激光器的基本原理, 对衍射光栅结构、光纤布拉格光栅结构、波导结构三种主要的TECDL结构进行了详细的综述和比较。阐述了各种可调谐外腔半导体激光器的国内外发展状况, 分析了不同外腔结构的优缺点, 最后总结可调谐外腔半导体激光器的不足, 展望了可调谐外腔半导体激光器的发展前景。

## 关键词

TECDL, Littrow, Littman, 衍射光栅, 波导

# Research Progress of Tunable External Cavity Semiconductor Laser

Linyu Zhang, Xuan Li, Wei Luo, Chunjie Zhao, Meiye Qiu, Huiying Kong, Zhaoxuan Zheng, Kangxun Sun, Jinhui Zhou, Chi Zhang, Junce Shi, Dongxin Xu, Zhongliang Qiao, Lin Li, Yi Qu, Zaijin Li\*

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, Academician Team Innovation Center of Hainan Province, Hainan International Joint Research Center for Semiconductor Lasers, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Oct. 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Tunable external cavity semiconductor lasers have excellent characteristics such as wide tuning range, narrow linewidth, high output power, single mode output, etc., which have a wide range of

\*通讯作者。

文章引用: 张林玉, 李轩, 罗薇, 赵春洁, 邱美叶, 孔惠颖, 郑照轩, 孙康迅, 周金辉, 张驰, 施钧策, 徐东昕, 乔忠良, 李林, 曲轶, 李再金. 可调谐外腔半导体激光器研究进展[J]. 应用物理, 2023, 13(11): 485-499.

DOI: 10.12677/app.2023.1311051

applications in the fields of white light interferometry, wavelength-division multiplexing systems, coherent optical communication, fiber optic sensing and so on. This paper first introduces the basic principle of tunable external cavity semiconductor laser and three main structures of TECDLs are reviewed and compared in detail, such as diffraction grating structure, fiber Bragg grating structure, and waveguide structure. Then describes the domestic and international development status of various tunable external cavity semiconductor lasers, analyzes the advantages and disadvantages of the different external cavity structures, and finally summarizes the shortcomings of tunable external cavity semiconductor lasers, and looks forward to the prospect of tunable external cavity semiconductor lasers development.

## Keywords

TECDL, Littrow, Littman, Diffraction Grating, Waveguide

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着光通信技术的快速发展,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和传输容量;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]。可调谐外腔半导体激光器(TECDL)通过引入衍射光栅等光学反馈元件来提供光反馈,增大谐振腔品质因数(Q值),将激光器线宽压窄至千赫兹级别,将外腔光学反馈元件同时作为调谐元件,实现了波长宽范围调谐(大于 100 nm)、单模输出、大激光功率、稳定输出光谱、大边模抑制比等优良性能,并且易与光纤耦合。相比于其他激光器(光纤激光器、固体激光器等),可调谐半导体激光器具有单纵模、窄线宽、输出波长连续可调、相位噪声低等突出的优点。此外可调谐窄线宽激光光源还在高分辨率光谱分析[2]、波分复用系统[3]、气体检测[4]、空间相干激光通信[5]、生物医学[6]、原子钟计时[7]等领域有着广泛的应用。

本文首先从 TECDL 的基本结构原理出发,根据外腔结构不同对 TECDL 进行分类,阐述了不同类型的 TECDL 的基本结构,以及它们的波长调谐原理。然后讨论了不同类型 TECDL 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 TECDL 面临的挑战和潜在的发展方向。

## 2. TECDL 原理

TECDL 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。TECDL 原理结构如图 1 所示。

半导体激光器两端面构成的谐振腔为内腔,半导体激光与外腔镜之间构成的谐振腔称为外腔。外腔镜将半导体激光部分输出光反馈回内腔,反馈光与内腔光场发生相互作用,外腔镜选择特定的波长输出激光。根据谐振腔结构设计和外腔反馈光学元件的不同,将 TECDL 主要分为衍射光栅型、光纤光栅型和波导型等。

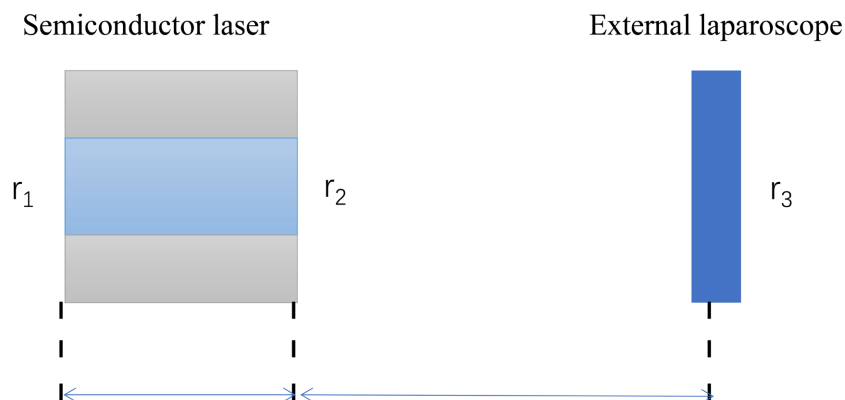


Figure 1. Principle structure diagram of TECDL

图 1. TECDL 原理结构图

### 3. TECDL 结构及其国内外研究进展

#### 3.1. 衍射光栅结构

衍射光栅作为反馈元件的 TECDL 主要有 Littrow 结构和 Littman 结构。

##### 3.1.1. Littrow 结构

Littrow 结构如图 2 所示。

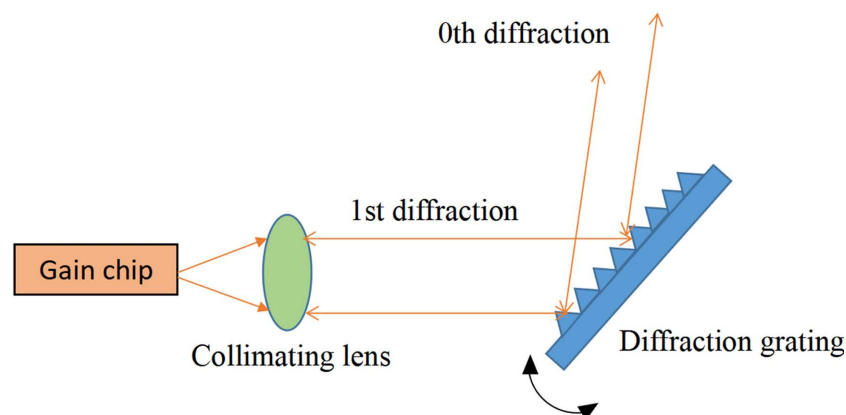


Figure 2. Littrow structure

图 2. Littrow 结构

对于 Littrow 结构，系统主要由半导体激光增益芯片、光学准直透镜、衍射光栅等组成。入射光经光栅衍射分为两路：反馈光和输出光。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光波长。

$$L = q(\lambda_q/2) \quad (1)$$

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (2)$$

其中  $L$  为激光器外腔长度， $\lambda$  为激光波长， $q$  为模式数， $d$  为光栅常数， $\theta$  为入射角。光栅角度  $\theta$  决定反馈光波长，改变光栅角度，从而调整谐振腔的激光波长，实现波长调谐的功能，反馈使特定波长模式增

益起振，其它模式衍射损耗，通常光栅一级衍射光用作反馈，零级衍射光输出，所以，这种结构的外腔激光器还能获得窄线宽输出以及得到相对较高的输出功率。

Littrow 结构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。目前，国内外多所大学以及诸多研究机构都对其开展了深入的研究，下面介绍近十年来 Littrow 结构 TECDL 的研究进展。

2011 年，孙艳光等[8]提出了一种利用铌钛酸铅电光偏转器作为波长调谐元件构成的稳定 Littrow 型可调谐外腔半导体激光器，结构如图 3 所示，压电陶瓷上下表面有一对平行的梯形电极，调整电压可以改变光束入射光栅角度，在 780.5 nm 处实现了 420 GHz 的单模大调谐范围。

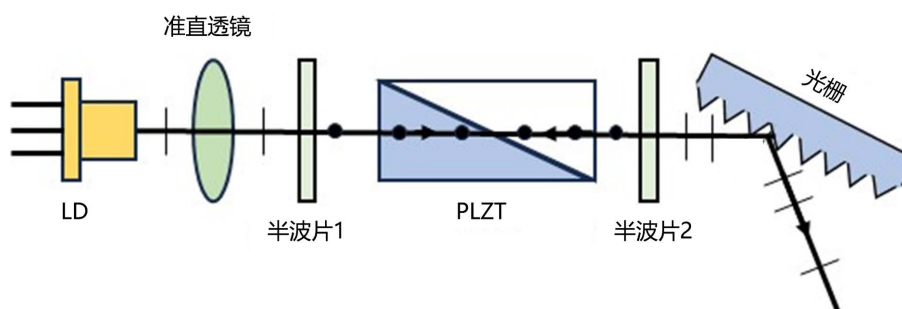


Figure 3. Littrow structure of TECDL

图 3. Littrow 结构 TECDL

2012 年，Britzger 等[9]提出了一种基于衍射光栅的二阶 Littrow 型 ECDL，采用三端口光栅耦合腔，原理是使用光栅二阶衍射光沿入射光路返回增益芯片，选择一级衍射方向为垂直光栅方向进行激光输出，一阶衍射效率越低，光栅反射率就越高，耦合腔精细度也就越高，该激光器调谐范围超过几千兆赫兹。

2013 年，Cai H 等[10]提出了一种基于 MEMS (微机电系统)的 Littrow 型可调谐外腔半导体激光器。该激光器由半导体增益芯片、光纤透镜、抛物面反射镜、光栅(MEMS 调谐元件)构成，如图 4 所示。光束由棒透镜准直，由反射镜反射，再由光栅衍射，然后在耦合到增益芯片之前再次反射。闪耀光栅围绕

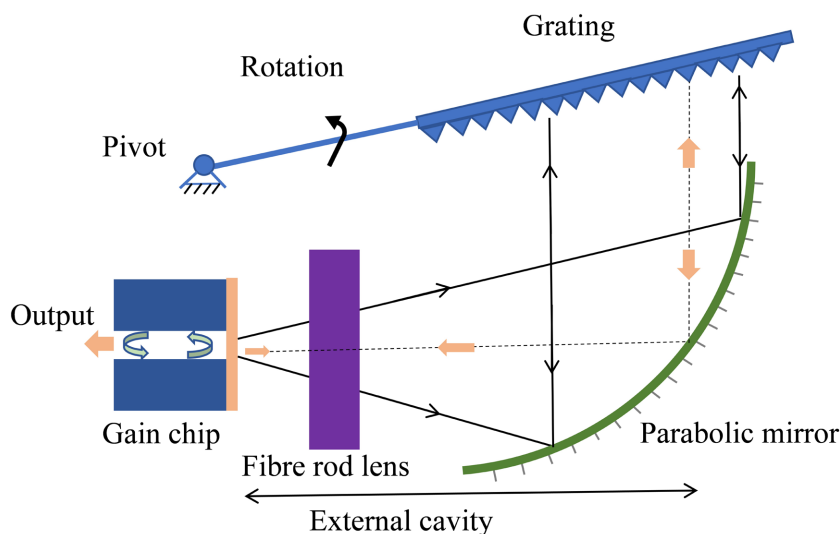


Figure 4. Schematic of the proposed MEMS tunable laser with a 3D micro-optical coupling system

图 4. 所提出的具有 3D 微光学耦合系统的 MEMS 可调谐激光器的示意图

远程枢轴旋转以进行波长调谐,所选波长被衍射回增益芯片,并在激光腔(增益芯片和外腔)中放大。该激光器可连续调谐 48.3 nm (1531.2 nm~1579.5 nm), SMSR 为 28 dB。与其他可调谐激光器相比,紧凑的 MEMS 可调谐激光器具有调谐速度快、调谐范围大等优点。

2015 年,李斌等[11]采用了反射式全息光栅作为光反馈元件,构建 Littrow 结构的 405 nm 外腔蓝紫半导体激光器。通过光栅线与增益芯片 pn 结平面平行的方式,实现光谱线宽从 1 nm 压窄至 0.1 nm,中心波长的输出功率高达 1.24 W,调谐范围为 3.6 nm (443.9~447.5 nm)的可调谐大功率蓝光激光。

2017 年,高志强等人[12]采用闪耀光栅作为光反馈元件研制 1.53  $\mu\text{m}$  外腔式半导体激光器,研究了光栅衍射角、温度、电流对激光器输出特性的影响和 P-I 特性。利用单角度面(SAF)型芯片、改进型 Littrow 外腔结构实现了激光器宽调谐、单纵模激光输出,连续运转模式下最大调谐范围可达 132 nm,最高输出功率 60 mW;脉冲运转模式下最大调谐范围 126 nm,最高输出功率 26.8 mW;连续模式下获得最窄线宽 25 pm。

2018 年,Guo 等[13]提出了一种使用反射镜与光栅结合的 Littrow 结构的外腔半导体激光器,反射镜平行于光栅,实现更宽的无跳模调谐范围并保持输出光方向不变。通过理论计算得出,最大无跳模可调谐范围可达到 4.34 nm,输出光方向横向偏移量仅为 0.033 mm。计算结果表明减小初始外腔长度有利于获得较宽的调谐范围和较小的输出光束横向位移。

2019 年,Podoskin 等[14]研究了基于反射衍射光栅的 Littrow 结构外腔和基于低光损耗的非对称异质结构的高功率半导体激光器。外腔激光器的连续波光输出功率可达 13 W,线宽为 0.15 nm。结果表明,激光芯片的长度减少到 1500  $\mu\text{m}$  可以将激光光谱的调谐范围扩展到 100 nm,边模抑制比为 45 dB。

2020 年,刘野等[15]采用 2400 line/mm 和 1800 line/mm 两种刻线密度的反射式全息光栅作为外部反馈元件搭建 638 nm 外腔半导体激光器,结构如图 5 所示。在 120 mA 的注入电流下,刻线密度为 2400 line/mm 的光栅外腔激光器的输出功率是 45.2 mW;采用刻线密度为 1800 line/mm 的光栅外腔激光器的输出功率是 38.7 mW,光谱线宽均压窄至 3.5 pm,分别实现了 9.4 nm 和 10.5 nm 宽度的波长调谐。

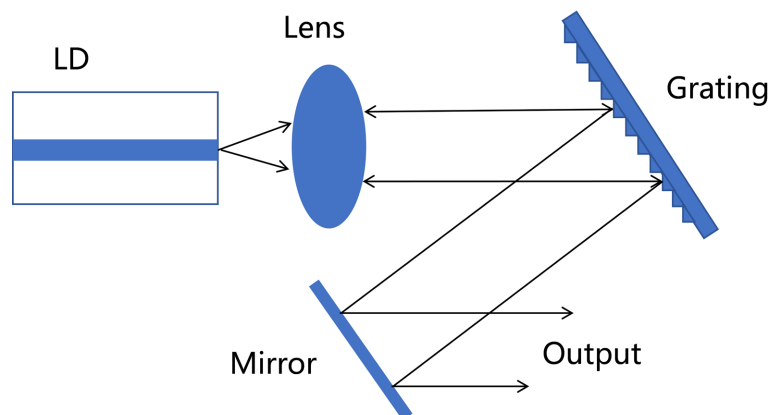


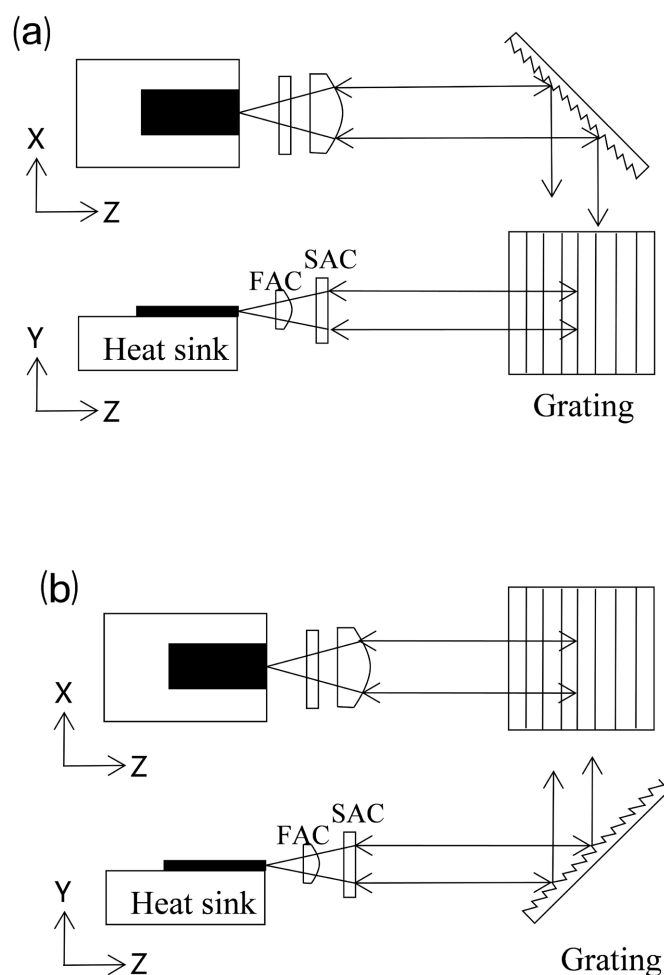
Figure 5. 638 nm external cavity semiconductor laser structure

图 5. 638 nm 外腔半导体激光器结构

2021 年,Wang Yan 等[16]研发了 1.5  $\mu\text{m}$  波段基于 InAs/InP 量子点激光器的 littrow 结构 TECDL,调谐范围达到了 92 nm,500 mA 电流下最大输出功率为 6.5 mW。

2023 年,苏鹏等[17]选用 970 nm 宽条形半导体激光器为增益器件,构成 Littrow 型 TECDL,采用衍射效率分别为 28%和 55%的反射式衍射光栅作为反馈元件,研究了光栅在不同入射光偏振放置条件下的外腔激光器的输出光谱特性。结果表明相比 P 偏振入射方式的激光器,S 偏振入射方式的光栅外腔激光

器的输出光谱较窄, 最终该结构实现了 27.87 nm 的波长调谐范围, 光谱线宽压窄至 0.2 nm, 输出功率达 1.11 W, 该激光器外腔结构及偏振入射方式结构如图 6 所示。



**Figure 6.** Schematic diagram of the structure of grating external cavity semiconductor lasers (a) P-polarized incident structure (b) S-polarized incident structure

**图 6.** 光栅外腔半导体激光器结构图(a) P 偏振入射结构(b) S 偏振入射结构

国内外研究人员为了提升 Littrow 结构 TECDL 的性能从各方面进行了深入研究, 实现调谐元件的多样化和扩大了调谐范围, 同时提高了激光器输出功率, 在光谱线宽窄化上有了显著进步。由于可以实现较宽的波长调谐范围和高光谱分辨率, 该类型激光器多应用于气体光谱检测、工业过程控制及精密测量校准等领域。

### 3.1.2. Littman 结构

Littman 结构是在 Littrow 结构的基础上加了一个反射镜, 其光栅部分固定不动, 反射镜起调谐作用, 通过控制反射镜角度, 将入射光原路返回, 结构如图 7 所示。

Littman 结构 20 世纪 90 年代应用于 TECDL 中, 目前该结构已成为 TECDL 的经典结构类型之一。

2009 年, 陈迪俊等[18]研究了 Littman-Metcalf 结构 TECDL 的偏振特性, 分析了 TECDL 的偏振性能, 对提高 TECDL 的偏振性能和开发具有圆形或椭圆形偏振输出的激光器有帮助。



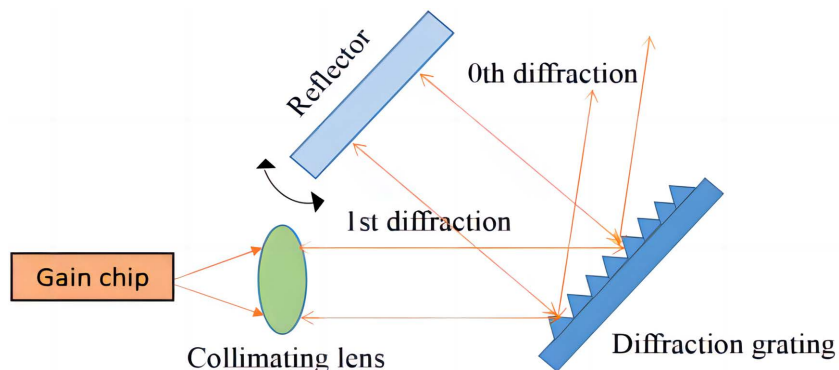


Figure 7. Littman structure  
图 7. Littman 结构

2012年, Di Zhang 等[19]提出了一种基于简单单轴 MEMS 反射镜的 Littman 型外腔可调谐半导体激光器。该器件结构紧凑, 具有可连续调谐的能力与超窄的线宽。实验结果表明该激光器在 C 波段可获得约 40 nm 的宽波长调谐范围, 窄线宽小于 50 kHz, 在整个调谐范围内可获得 $\pm 1$  GHz 的高波长精度。该激光器在单载波偏振复用正交移相键控(PM-QPSK)和多载波正交频分复用(OFDM)相干系统中均表现出优异的性能。

2013年, 魏芳等[20]报道了一种采用星形柔性铰链调谐结构的 Littman 结构 TECDL, 该结构坚固紧凑, 实现了工作波长为 780 nm 的单模输出, 其线宽为 200 KHz, 无跳模调谐范围大于 80 GHz。

2014年, Hai Gong 等[21]基于“非完美”转轴点的内腔和外腔同步调谐技术对 774.5 nm 的 Littman-ECDL 进行了无跳模范围扩展试验, 获得了优于 78 GHz 的连续单纵模调谐输出。

2016年, 罗威等[22]报道了一种基于 Littman-Metcalf 结构的 6.9  $\mu\text{m}$  波段外腔量子级联激光器, 通过旋转反射镜, 实现了调谐范围 1340~1640  $\text{cm}^{-1}$ , 范围超过 300  $\text{cm}^{-1}$  的连续调谐, 线宽小于 0.14  $\text{cm}^{-1}$ 。

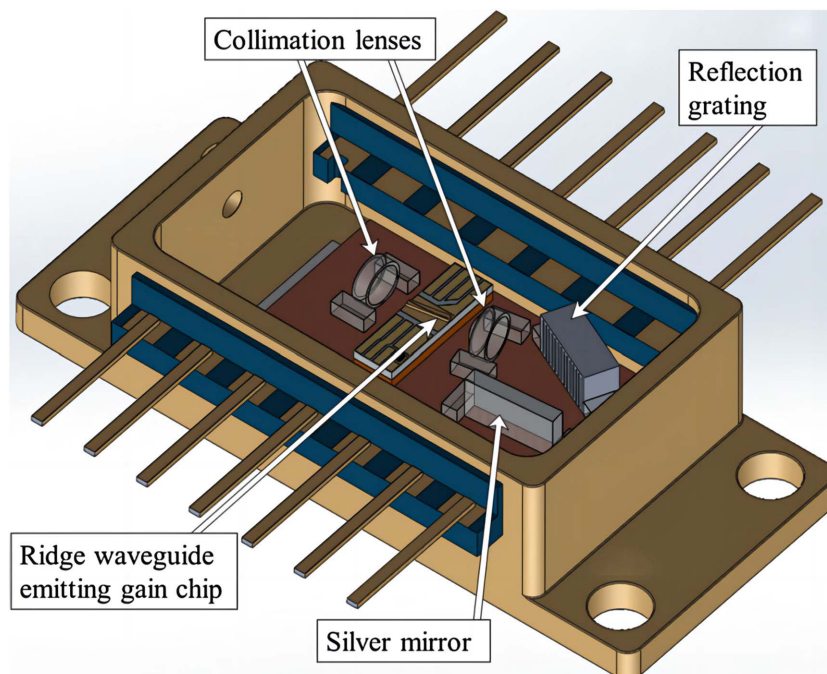
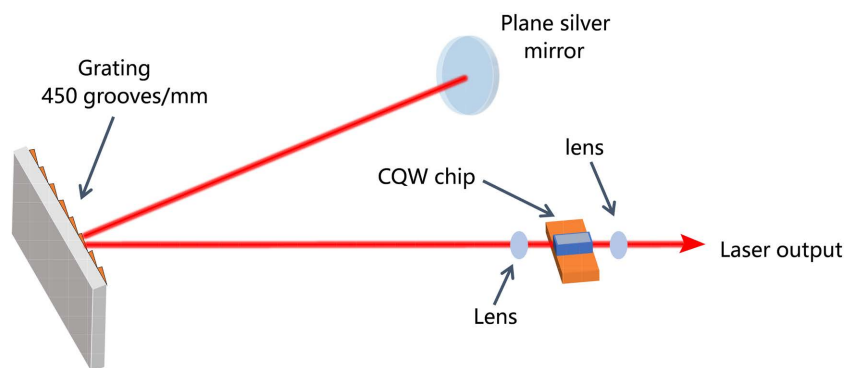


Figure 8. Structure of the micro-Littman-Metcalf laser system  
图 8. 微型 Littman-Metcalf 激光系统结构

2017年, Jiménez A等[23]提出了一种基于微型 Littman 结构、体全息光栅和微透射光栅三种结构的小型 TECDL, 其结构如图 8 所示。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、边模抑制比高等特点, 可实现便携性和手持设备操作。该激光器功率超过 50 mW, 边模抑制比达到 60 dB, 线宽小于 100 kHz, 调谐范围达到 GHz 级。

2018年, Chichkov等[24]研究了 3.2  $\mu\text{m}$  基于 GaSb 的级联 I 型量子阱可调谐激光器的研究。该激光器采用改进型 Littman-Metcalf 结构, 选用刻线密度为 450 line/mm 的光栅作为外部谐振腔的调谐元件, 增益芯片是具有窄脊波导结构的级联泵浦 GaSb 芯片, 如图 9 所示。该激光器室温下连续波输出功率达到 8 mW, 波长调谐范围超过了 300 nm (3  $\mu\text{m}$  波段)。



**Figure 9.** Structure of wavelength tunable GaSb-based quantum well laser  
**图 9.** 波长可调谐 GaSb 基量子阱激光器的结构

2020年, Morten Hoppe等[25]设计了一种基于 Littman 结构的 GaSb 可调谐外腔半导体激光器。该 Littman 外腔半导体激光器包括准直半导体激光芯片、MEMS 反射镜和反射光栅。可连续调谐 105 nm (1480 nm~1600 nm), SMSR 大于 50 dB。

2023年, 盛立文等[26]采用闪耀光栅作为外腔反馈元件, 设计了一台 1550 nm 波段的基于 Littman-Metcalf 结构的宽范围无跳模外腔 TECDL。利用一端镀有增透膜的单角度面半导体增益芯片作为本征腔种子源, 通过合理优化外腔结构参数, 在 410 mA 工作电流下, 实现了 100 nm 宽度的无跳模波长调谐、峰值输出功率为 16.95 dBm, 边模抑制比为 65.54 dB。

Littrow 和 Littman 结构 TECDL, 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, 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, 比 Littrow 结构 ECDL 具有更高的损耗。Littrow-TECDL 与 Littman-TECDL 性能参数对比分析如表 1 所示。

**Table 1.** Comparison of diffraction grating type TECDL performance parameters  
**表 1.** 衍射光栅型 TECDL 性能参数对比

类型	Littrow	Littman
结构	简单	复杂
调谐机制	旋转光栅	旋转反射镜
调谐范围	宽	窄
线宽	宽	窄



Continued

输出功率	大	小
SMSR	低	高
成本	低	高

### 3.2. 光纤光栅结构

光纤光栅型是在外腔型半导体激光器中引入光纤布拉格光栅(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外腔半导体激光器(FBG-TECDL),结构如图10所示。



Figure 10. Structure of FBG-ECDL structure

图 10. FBG-ECDL 结构

FBG 具有窄带高反射率的特性,此结构的激光器可通过改变光纤长度和布拉格波长实现腔长延长和模式调谐,相比于 Littrow 结构和 Littman 结构,光纤光栅结构更简单,稳定性好,极窄的线宽特性以及良好的动态单模特性。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 FBG-TECDL 波长的调谐功能。

国外对 FBG-TECDL 的研究较早,最初英国电信实验室研究的 F-P 腔耦合光纤光栅外腔实现了 50 kHz 的线宽输出,随后,美国贝尔实验室和日本 NTT 公司也都开展了光纤光栅外腔激光器的研究。近年来,国内中科院半导体所、上海光机所等科研机构也都对 FBG-TECDL 进行了研究。

2011 年, Loh W 等[27]报道了一种 1550 nm 波段高功率、窄线宽的 FBG-TECDL。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和一个 FBG 耦合,实现洛伦兹线宽为 1 kHz,输出功率 370 mW。

2014 年, Duraev V P 等[28]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,实现调谐范围 1.5 nm,调谐步长小于 0.02 nm,输出功率 10 mW,线宽 10 kHz。

2015 年,潘碧玮等[29]采用多量子阱掩埋条形增益芯片和拉锥 FBG,制作了 1.5 μm 波段 FBG-TECDL,结构如图 11 所示[17]。该结构实现了 30~250 mA 驱动电流下线宽小于 15.48 kHz,实测最小线宽为 6.42 kHz,频率稳定性为  $7.2 \times 10^{-8}/s$ ,边模抑制比大于 40dB,最大出纤功率大于 10 mW。

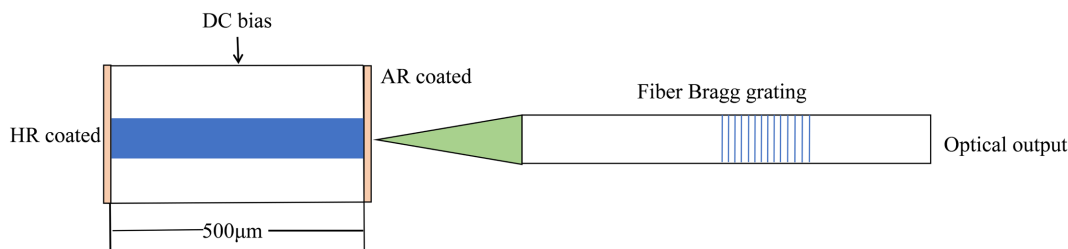


Figure 11. Structure of integrated FBG-TECDL

图 11. 集成 FBG-TECDL 结构

2017 年, Zhang L 等[30]报道了 1550 nm 波段热调谐窄线宽 FBG-TECDL,实现了 35 kHz 线宽和 65

pm/°C的线性调谐速度，连续无模式跳变调谐范围为0.5 nm。

2018年，杜悦宁等[31]报道了光纤光栅自注入锁定的窄线宽外腔半导体激光器，在1550 nm波段实现最小洛伦兹线宽小于1 kHz，最大输出功率12 mW，SMSR超过50 dB。

2020年，Gao S等[32]利用光纤光栅和分布式反馈激光器的温度进行波长调谐。当光纤光栅在40°C，DFB在10°C时，输出1550.32 nm和1552.40 nm的双波长激光。二者的工作温差从30°C变到0°C时，波长间隔可从2.08 nm调节到5.34 nm，实现波长调谐。

2021年，梁虹等[33]利用单角度面半导体增益芯片及FBG，研制了1310 nm波段的可调谐外腔半导体激光器。该ECDL集成在一个紧凑的蝶形封装结构中，当工作温度和电流设置为25°C和280 mA时，ECDL的发射波长为1309.8 nm，3 dB洛伦兹线宽为18 kHz。另外，在工作温度为25°C时，激光无跳模电流调谐范围为7 GHz，调谐系数为47 MHz·mA<sup>-1</sup>。该ECDL可广泛应用于光纤传感和光纤通信等领域。

FBG-TECDL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，该激光器的线宽可以达到几kHz，甚至1 kHz以下，是其最突出的特点。但因其调谐方式受限，波长调谐范围很小，一般仅有几nm。目前，FBG-TECDL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、相干光谱分析、合成孔径雷达等领域。

### 3.3. 波导结构

波导结构通常是由半导体光放大器(SOA)和集成光子芯片外腔耦合。SOA提供增益放大，集成光子芯片外腔进行波长选择，图12为硅基波导的TEDCL的典型结构。SOA耦合到硅基波导的光波通过两个微环谐振器(MRR)发生滤波，其原理是设置两个MRR的半径略微不同，自由光谱范围(FSR)为：

$$FSR = \lambda^2 / 2\pi r n_{eff} \quad (3)$$

其中， $\lambda$ 为激光波长， $r$ 为MRR半径， $n_{eff}$ 为MRR硅波导有效折射率。两个MRR的透射光谱相互叠加，相互匹配峰的波长通过模式竞争决定激光波长，通过热光效应，调节Pt加热器，MRR的FSR发生变化，导致传输峰移动，然后通过游标效应，可以在宽范围内进行波长调谐。

这种系统在可靠性、低功耗性、波长可调谐性、线宽特性等方面远远优于基于分立式元件的激光器系统。目前常用的MRR光波导有Si基、SiON基、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>基等。随着新一代MRR-TECDL的发展，线宽已可以达到百Hz量级，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。

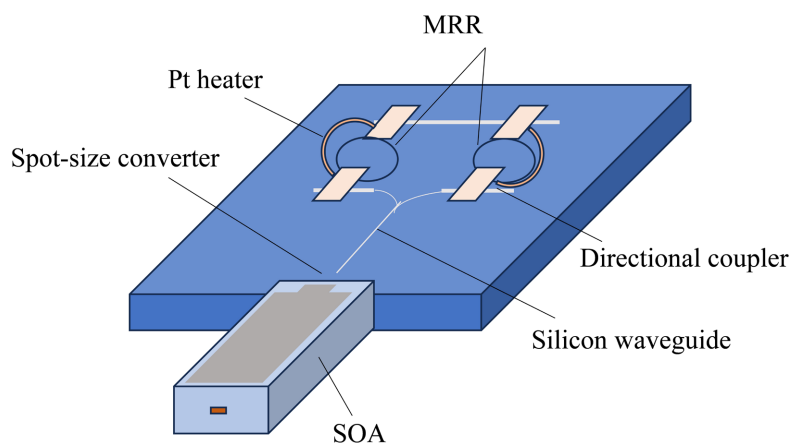


Figure 12. Structure of silicon based waveguide TECDL

图12. 硅基波导 TECDL 结构

基于 MRR 的半导体激光器于 20 世纪 90 年代就有研究人员对其探究, 近些年更是发展飞速, 衍生出了各种不同的波导材料、结构等。单个 MRR 因其光谱输出仅为梳状谱, 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。

2009 年, Chu T 等[34]研究人员提出采用硅光子技术制作 TECDL。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。

2011 年, Yoon K H [35]报道了基于聚合物布拉格反射器(PBR)和单个 MRR 的 TECDL 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, 单模振荡激光。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。

2014 年, Debregeas H 等[36]报道了一种基于硅环谐振器和马赫曾德尔干涉仪(MZI)的反射型 SOA 和 SiO<sub>2</sub> 平面光波导混合集成的 TECDL。外腔由两个 MRR 组成, 第一个 MRR 的 FSR 设置为 25 GHz, 第二个 MRR 内集成 MZI, 通过改变环之间的游标系数来修改外腔设计以进一步扩大调谐范围, 实现了输出功率 5 dBm、C 波段 35 nm 调谐范围, 超窄线宽 2 kHz。

2015, S. Srinivasan 等[37]通过异质集成, 在增益芯片两侧各集成一个双 MRR 作谐振腔, 波长调谐则通过热调谐 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。

2016 年, Fan Y 等[38]报道了基于 InP 的反射型 SOA 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 外腔波导集成的 TECDL, 实现了在 C 波段超过 43 nm 的调谐范围, 最小线宽约为 90 kHz, SMSR 为 35 dB。

2017 年, Fan Y 等[39]报道了 InP-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 集成的 TECDL, 采用锥形波导高效率耦合 InP-SOA 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导, 外腔波导由相位调节部分、可调环形镜和三个高 Q 值 MRR 组成, 获得了最小线宽 290 Hz 和最大调谐范围 81 nm。

2018 年, Guan H 等[40]报道了用于相干通信的宽调谐窄线宽 III-V/硅基混合 TECDL。通过双微环游标结构和 Y 型连接组成的波长选择反射器, 实现了以 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。

2018 年, Lin Y 等[41]报道了基于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导平台由两个 MRR 组成, 并且利用游标效应实现波长调谐, 其结构如图 13 所示。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。

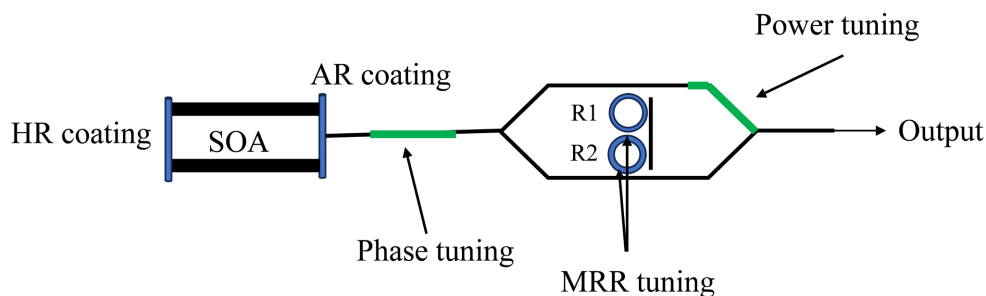


Figure 13. Structure of a MRR-TECDL

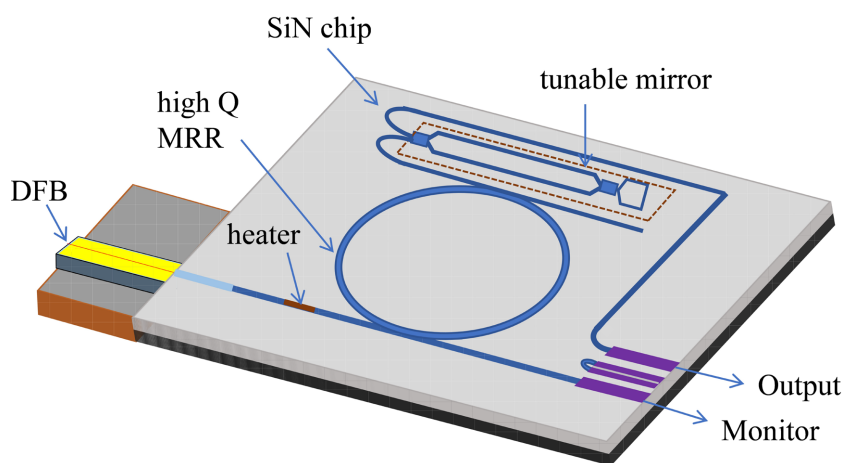
图 13. MRR-TECDL 结构

2019 年, Xiang C 等[42]报道了基于外部扩展 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 布拉格光栅和半导体激光增益芯片组成了超窄线

宽固定波长混合激光器，实现激光输出功率 24 mW，洛伦兹线宽 320 Hz，波长为 1544 nm。

2021 年，Morton P A 等[43]报道了一种新型相干可调谐激光器。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，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，功率为 15 mW。

2023 年，苏庆帅等[44]报道了光反馈强度可调的自注入锁定窄线宽可调谐激光器。激光器由 DFB 激光器与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  外腔芯片经端面耦合构成， $\text{Si}_3\text{N}_4$  芯片除含有高 Q 值微环谐振腔外，还包含一个由 MZI 和环形镜构成的反射率可调反射镜，结构如图 14 所示。当反射镜的反射率增大至 32% 时，得到最佳噪声抑制效果，本征线宽低至 60 Hz，积分线宽为 15.47 kHz @ 1 ms，延时自外差线宽为 4.5 kHz。



**Figure 14.** Structural of hybrid integrated self-injection locked narrow line width laser  
**图 14.** 混合集成自注入锁定窄线宽激光器的结构

MRR-TECDL 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，而新一代 MRR-TECDL 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。MRR-TECDL 常用在光通信领域，例如微波通信中的微波发生器、密集波分复用系统和 DC 收发器中的光源部分以及相干光传输等。

#### 4. 总结与展望

TECDL 由于具有宽调谐范围和窄线宽等突出特点而被广泛应用于激光雷达、光通信系统、光谱分析、原子钟计时等领域。本文对 TECDL 的结构及原理进行了分析，综述了近十年来该领域的研究进展。衍射光栅结构 TECDL 优势在于具有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 结构具有更窄的线宽特性。这两种结构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。光纤光栅结构 TECDL 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。波导结构 TECDL 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。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 TECDL 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。

## 基金项目

项目资助信息: 海南省自然科学基金高层次人才项目(622RC671)、海南省自然科学基金项目(120MS031)、海南师范大学大学生创新创业开放基金(榕树基金)项目(RSYH20231165825X、RSXH20231165803X、RSXH20231165811X、RSYH20231165806X、RSMY20231165824X、RSYN20231165833X)、海南师范大学研究生创新科研项目(hsyx22022-81)和国家自然科学基金项目(62174046、62064004、61964007、61864002)。

## 参考文献

- [1] Cheng, Q.X., Bahadori, M., Glick, M., Rumley, S. and Bergman, K. (2018) Recent Advances in Optical Technologies for Data Centers: A Review. *Optica*, **5**, 1354-1370. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001354>
- [2] Yang, Q.F., Shen, B., Wang, H., et al. (2019) Vernier Spectrometer Using Counterpropagating Soliton Microcombs. *Science*, **363**, 965-968. <https://doi.org/10.1126/science.aaw2317>
- [3] Sato, T., Yamaoto, F., Tsuji, K. and Horiguchi, T. (2002) An Uncooled External Cavity Diode Laser for Coarse-WDM Access Network Systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, **14**, 1001-1003. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.1012412>
- [4] Sugiyama, T. and Ueda, T. (2006) In-situ Measurement for Gas Concentrations using Tunable Lasers. *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, **126**, 464-468. <https://doi.org/10.1541/ieejsmas.126.464>
- [5] Wu, W.R., Chen, M., Zhang, Z., et al. (2018) Overview of Deep Space Laser Communication. *Science China Information Sciences*, **61**, 040301:1-040301:12. <http://scis.scichina.com/en/2018/040301.pdf>
- [6] Grafen, M., Delbeck, S., Busch, H., et al. (2018) Evaluation and Benchmarking of an EC-QCL-Based Mid-Infrared Spectrometer for Monitoring Metabolic Blood Parameters in Critical Care Units. *Proceedings of Optical Diagnostics and Sensing XVIII: Toward Point-of-Care Diagnostics*, San Francisco, 20 February 2018, 42-51. <https://doi.org/10.1117/12.2289625>
- [7] Newman, Z.L., Maurice, V., Drake, T., et al. (2019) Architecture for the Photonic Integration of an Optical Atomic Clock. *Optica*, **6**, 680-685. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.000680>
- [8] Sun, Y.G., Wei, F., Chen, D.J., et al. (2011) Design of a Mode-Hop-Free Tunable External Cavity Diode Laser with a PLZT Electro-Optic Ceramic Deflector. *Proceedings of the SPIE*, **8192**, Article ID: 81923I. <https://doi.org/10.1117/12.900966>
- [9] Britzger, M., Khalaidovski, A., Hemb, B., et al. (2012) External-Cavity Diode Laser in Second-Order Littrow Configuration. *Optics Letters*, **37**, 3117-3119. <https://doi.org/10.1364/OL.37.003117>
- [10] Cai, H., Tao, J.F., Gu, Y.D., Kwong, D.L. and Liu, A.Q. (2013) Demonstration of a Single-Chip Integrated MEMS Tunable Laser with a Large Wavelength Tuning Range. 2013 *IEEE International Electron Devices Meeting*, Washington DC, 9-11 December 2013. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2013.6724656>
- [11] 李斌, 涂斌, 徐勇跃, 李哲, 余安澜, 王新兵, 左都罗. 405nm 波段光栅外腔窄线宽蓝紫光半导体激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 193-198.
- [12] 高志强, 黄彦, 张宇露, 等. 宽调谐外腔式 1.53  $\mu\text{m}$  近红外半导体激光器研究[J]. *遥测遥控*, 2017, 38(5): 55-61.
- [13] Guo, H. and Olamax, G.T. (2018) Analysis of No Mode-Hop Tuning of Mirror-Grating External-Cavity Diode Laser. *Optics Communications*, **421**, 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.03.074>
- [14] Podoskin, A., Golovin, V., Gavrina, P., Veselov, D., Zolotarev, V., Shamakhov, V., Nikolaev, D., Leshko, A., Slipchenko, S., Pikhitin, N. and Kopéev, P. (2019) Ultrabroad Tuning Range (100 nm) of External-Cavity Continuous-Wave High-Power Semiconductor Lasers Based on a Single InGaAs Quantum Well. *Applied Optics*, **58**, 9089-9093. <https://doi.org/10.1364/AO.58.009089>
- [15] 刘野, 刘宇, 肖辉东, 李洪玲, 曲大鹏, 郑权. 638 nm 光栅外腔窄线宽半导体激光器[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1249-1256.
- [16] Wang, Y., Luo, S., Ji, H.M., Qu, D. and Huang, Y.D. (2021) Continuous-Wave Operation of InAs/InP Quantum Dot Tunable External-Cavity Laser Grown by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition. *Chinese Physics B*, **30**, 018106-1-018106-4. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abcfa4>
- [17] 苏鹏, 高欣, 张悦, 赵仁泽, 伏丁阳, 薄报学. 970 nm 高功率光栅外腔可调谐半导体激光器[J]. *发光学报*, 2023,



- 44(4): 664-672.
- [18] Chen, D., Fang, Z., Cai, H. and Qu, R.H. (2009) Polarization Characteristics of an External Cavity Diode Laser with Littman—Metcalf Configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, **21**, 984-986. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2021481>
- [19] Zhang, D., Zhao, J.Y., Yang, Q., Liu, W., Fu, Y.F., Li, C., Luo, M., Hu, S.L., Hu, Q.G. and Wang, L. (2012) Compact Diode MEMS External Cavity Tunable Laser with Ultra-Narrow Linewidth for Coherent Detection. *Optics Express*, **20**, 19670-19682. <https://doi.org/10.1364/OE.20.019670>
- [20] 魏芳, 陈迪俊, 辛国锋, 等. 紧凑坚固 Littman-Metcalf 型可调谐外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 68-70, 73-76.
- [21] Gong, H., Liu, Z.G., Zhou, Y.L. and Zhang, W.B. (2014) Extending the Mode-Hop-Free Tuning Range of an External-Cavity Diode Laser by Synchronous Tuning with Mode Matching. *Applied Optics*, **53**, 7878-7884. <https://doi.org/10.1364/AO.53.007878>
- [22] Luo, W. and Duan, C.X. (2016) A Broadband Pulsed External-Cavity Quantum Cascade Laser Operating Near 6.9  $\mu\text{m}$ . *Chinese Physics Letters*, **33**, Article ID: 024207. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/33/2/024207>
- [23] Jiménez, A., Milde, T., Staacke, N., *et al.* (2017) Narrow-Line External Cavity Diode Laser Micro-Packaging in the NIR and MIR Spectral Range. *Applied Physics B*, **123**, Article No. 207. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6777-9>
- [24] Chichkov, N.B., Yadav, A., Zherebtsov, E., *et al.* (2018) Wavelength-Tunable, GaSb-Based, Cascaded Type-I Quantum-Well Laser Emitting over a Range of 300 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, **30**, 1941-1943. <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2873049>
- [25] Morten, H., Hanna, R., Sebastian, S., *et al.* (2020) Wide and Fast Mode-Hop Free MEMS Tunable ECDL Concept and Realization in the NIR and MIR Spectral Regime. *Proceedings Volume 11293, MOEMS and Miniaturized Systems XIX*, San Francisco, 28 February 2020, 80-90. <https://doi.org/10.1117/12.2546213>
- [26] 盛立文, 葛崇琳, 曹乾涛, 等. 宽范围无跳模外腔可调谐半导体激光器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 152-158.
- [27] Loh, W., O'Donnell, F.J., Plant, J.J., *et al.* (2011) Packaged, High-Power, Narrow-Linewidth Slab-Coupled Optical Waveguide External Cavity Laser (SCOWECL). *IEEE Photonics Technology Letters*, **23**, 974-976. <https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2146245>
- [28] Duraev, V.P. and Medvedev, S.V. (2014) Single-Frequency Tunable Semiconductor Lasers. *Semiconductors*, **48**, 120-122. <https://doi.org/10.1134/S1063782614010096>
- [29] 潘碧玮, 余力强, 陆丹, 李林森, 张莉萌, 李召松, 苏辉, 赵玲娟. 20kHz 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.
- [30] Zhang, L., Wei, F., Sun, G., *et al.* (2017) Thermal Tunable Narrow Linewidth External Cavity Laser with Thermal Enhanced FBG. *IEEE Photonics Technology Letters*, **29**, 385-388. <https://doi.org/10.1109/LPT.2017.2648889>
- [31] 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[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [32] Gao, S., Luo, M., Jing, Z.G. and Chen, H.Y. (2020) A Tunable Dual-Wavelength Fiber Ring-Cavity Laser Based on a FBG and DFB Laser Injection. *Optik*, **203**, Article ID: 163961. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163961>
- [33] 梁虹, 魏芳, 孙延光, 等. 基于光纤光栅的 1310nm 波段窄线宽混合集成外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 34-40.
- [34] Chu, T., Fujioka, N. and Ishizaka, M. (2009) Compact, Lower-Power-Consumption Wavelength Tunable Laser Fabricated with Silicon Photonic-Wire Waveguide Micro-Ring Resonators. *Optics Express*, **17**, 14063-14068. <https://doi.org/10.1364/OE.17.014063>
- [35] Yoon, K.H., Kwon, O.K., Kim, K.S., *et al.* (2011) Ring-Resonator-Integrated Tunable External Cavity Laser Employing EAM and SOA. *Optics Express*, **19**, 25465-25470. <https://doi.org/10.1364/OE.19.025465>
- [36] Debregeas, H., Ferrari, C., Cappuzzo, M.A., *et al.* (2014) 2kHz Linewidth C-Band Tunable Laser by Hybrid Integration of Reflective SOA and SiO<sub>2</sub> PLC External Cavity. 2014 *International Semiconductor Laser Conference*, Palma de Mallorca, 7-10 September 2014, 50-51. <https://doi.org/10.1109/ISLC.2014.158>
- [37] Srinivasan, S., Davenport, M., Komljenovic, T., *et al.* (2015) Coupled-Ring-Resonator-Mirror-Based Heterogeneous III—V Silicon Tunable Laser. *IEEE Photonics Journal*, **7**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2428255>
- [38] Fan, Y., Epping, P.J., Oldenbeuving, M.R., *et al.* (2016) Optically Integrated InP—Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Hybrid Laser. *IEEE Photonics Journal*, **8**, 1-11. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2633402>
- [39] Fan, Y., Oldenbeuving, R.M., Roeloffzen, C.G.H., *et al.* (2017) 290 Hz Intrinsic Linewidth from an Integrated Optical Chip-Based Widely Tunable InP-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Hybrid Laser. 2017 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San

- 
- Jose, 14-19 May 2017, 1-2. [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2017.JTh5C.9](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2017.JTh5C.9)
- [40] Guan, H., Novack, A., Galfsky, T., *et al.* (2018) Widely-Tunable, Narrow-Linewidth III-V/Silicon Hybrid External-Cavity Laser for Coherent Communication. *Optics Express*, **26**, 7920-7933. <https://doi.org/10.1364/OE.26.007920>
- [41] Lin, Y., Fan, Y., Boller, K.J., *et al.* (2018) Characterization of Hybrid InP-TriPleX Photonic Integrated Tunable Lasers Based on Silicon Nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ ) Microring Resonators for Optical Coherent System. *IEEE Photonics Journal*, **10**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2842026>
- [42] Xiang, C., Morton, P.A. and Bowers, J.E. (2019) Ultra-Narrow Linewidth Laser Based on a Semiconductor Gain Chip and Extended  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Bragg Grating. *Optics Letters*, **44**, 3825-3828. <https://doi.org/10.1364/OL.44.003825>
- [43] Morton, P.A., Xiang, C., Khurgin, J.B., *et al.* (2022) Integrated Coherent Tunable Laser (ICTL) with Ultra-Wideband Wavelength Tuning and Sub-100 Hz Lorentzian Linewidth. *Journal of Lightwave Technology*, **40**, 1802-1809. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3127155>
- [44] 苏庆帅, 魏芳, 陈晨, 皮浩洋, 陈迪俊, 杨丰赫, 武慧敏, 章郑豪, 杨飞, 叶青, 蔡海文. 可调谐自注入锁定窄线宽片上光源[J]. 中国激光, 2023, 50(2): 148-149.