

SCIENTIA SINICA Informationis

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛

评述

窄线宽半导体激光器研究进展

郎兴凯^{1,2}, 贾鹏^{1*}, 陈泳屹^{1*}, 秦莉¹, 梁磊¹, 陈超¹, 王玉冰¹, 单肖楠¹, 宁永强¹, 王立军^{1*}

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

2. 中国科学院大学大珩学院, 北京 100049

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

收稿日期: 2018–12–31; 接受日期: 2019–02–18; 网络出版日期: 2019–06–06

国家重点研发计划项目 (批准号: 2017YFB0405100, 2016YFE0126800)、中国科学院前沿科学重点研究项目 (批准号: QYZDY-SSW-JSC006)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61727822, 61674148, 11604328, 51672264) 和吉林省科技厅项目 (批准号: 20160520017JH, 20170623024TC) 资助

摘要 人类社会正迎来智能出行时代,智能汽车的发展对高精度雷达探测技术的要求越来越高,而 新型全固态激光雷达,具有分辨率高、抗有源干扰能力强、体积小、重量轻、成本低等优势,可满足 未来智能汽车的需求. 窄线宽半导体激光器作为全固态激光雷达的理想光源,其技术的进步与发展 能大幅提升全固态激光雷达的实用化进程.本文详细介绍了当前国际上窄线宽半导体激光技术及发 展现状,并分析讨论了各种窄线宽激光器的设计思路、关键技术及光学特性,最后展望了窄线宽半 导体激光器的发展前景.

关键词 半导体激光器,窄线宽,内腔光反馈技术,外腔光反馈技术,全固态激光雷达

1 引言

1.1 研究背景

人类社会正迎来智能出行时代,智能汽车的发展对高精度探测技术的要求越来越高,因此迫切需 要发展高精度雷达技术.

传统的高精度雷达技术,如微波雷达、毫米波雷达等,因其探测精度低、体积及重量大,不适用于 智能汽车搭载,而全固态激光雷达具有分辨率高、抗有源干扰能力强、体积小、重量轻、成本低等优势,可满足未来智能汽车对高精度探测技术的需求.

窄线宽半导体激光器具有体积小、重量轻、效率高、寿命长、可直接电流驱动、光谱线宽窄、相干性好等优势,是新一代高精度全固态激光雷达的理想光源.窄线宽半导体激光器通常在谐振腔中集成频率选择结构或者在激光腔外部与选模器件进行耦合,从而控制不同波长的增益损耗,来实现压缩 其光谱线宽的目的.

引用格式: 郎兴凯, 贾鹏, 陈泳屹, 等. 窄线宽半导体激光器研究进展. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 649–662, doi: 10.1360/ N112018-00345 Lang X K, Jia P, Chen Y Y, et al. Advances in narrow linewidth diode lasers (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 649–662, doi: 10.1360/N112018-00345

© 2019《中国科学》杂志社



1.2 国内外研究动态与现状

半导体激光器压窄线宽的方法主要分为两类:内腔光反馈法和外腔光反馈法.随着全固态激光雷 达技术的快速发展,需要进一步提高扫描速率,增加探测距离和成像清晰度.这些方面的提升也需要提 升半导体激光器的光谱特性,如减低激光器的线宽、抑制低相位噪声和低相对强度噪声等.压窄激光 器的线宽特征可以提高光束的传输距离和成像清晰度.降低半导体激光器线宽的方法主要有增加输出 功率、降低线宽增强因子、降低激光器的固有线宽的方式.

目前,国际上在窄线宽半导体激光器研究领域比较有代表性的研究机构和公司有: 德国的 费迪南·布劳恩研究所 (Ferdinand Braun Institute)、莱布尼茨高频率技术研究所 (Leibniz Institute of High Frequency Technology of Germany, FBH)、德国 DILAS 公司、美国贝尔实验室 (Bell Laboratory)、普林斯顿大学 (Princeton University)、法国 III-V 实验室、日本东北大学 (Tohoku University)、 爱尔兰都柏林大学 (University College Dublin)等.在内腔光反馈技术方面,各研究机构采用新型外 延芯片结构和新型光栅制备技术,成功将半导体激光器的线宽降低至 10 kHz. 2016年,德国卡塞尔 大学 (University of Kassel)^[1]提出一种高质量量子点分布反馈 (distributed feedback, DFB) 半导体激 光器,成功将激光线宽降低至 10 kHz.随后,芬兰坦佩雷大学 (University of Tampere)^[2]采用纳米压 印技术制备出侧向耦合表面光栅 DFB 激光器,实现激光功率为 28.9 mW、线宽 < 10 kHz.在外腔 反馈技术方面,德国 FBH 研究所^[3]提出利用 DFB 激光芯片与集成式共焦法布里 – 珀罗腔 (Fabry– Pérot cavity, F-P) 谐振器等组成共振反馈谐振腔,实现输出功率为 50 mW, 洛伦兹 (Lorentz) 线宽仅为 15.7 Hz, 为目前国际最高水平.

国内开展有关窄线宽半导体激光器的研究稍晚于国外研究机构,主要的研究机构有:北京大学、 浙江大学、中国科学院半导体研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海 光学精密机械研究所等.在内腔光反馈技术方面,国内研究机构已成功将半导体激光线宽降低至 kHz 量级,中国科学院半导体研究所^[4]报道了基于单片集成非对称相移 DFB 激光器开发的窄线宽激光器 模块,实现激发波长 1550 nm,激光功率 26 mW,最窄激光线宽达到 35 kHz.在外腔光反馈技术方面, 中国计量科学研究院^[5]采用高精度双镜式非共焦腔 Littman 结构,成功降低外腔半导体激光器的激 光线宽至 100 Hz,瞬时洛伦兹线宽降低至 30 Hz.

本研究团队研究设计并制备了一种宽条高阶光栅分布布拉格反射 (distributed Bragg reflector, DBR) 激光器 ^[6],这种 DBR 激光器实现了 3 dB 光谱线宽小于 0.04 nm (13.13 GHz),出光功率 213 mW 的稳定单纵模激光输出,其边模抑制比达到 42 dB. 而后又提出了一种基于增益耦合机理 的表面浅刻蚀高阶光栅分布反馈半导体激光器 ^[7]. 这种高阶光栅 DFB 半导体激光器,实现了单边 144 mW 高功率单纵模激光输出, 3 dB 线宽为 0.04 nm (12.62 GHz),边模抑制比 (side-mode suppression ratio, SMSR) 达到 29 dB.

1.3 本文章节介绍

本文详细介绍了各种新型的窄线宽半导体激光器的设计思路、关键技术及光学特性. 第 2 节介 绍了基于内腔光反馈法的窄线宽半导体激光器研究进展,包括分布反馈半导体激光器、分布布拉格反 射半导体激光器和耦合腔半导体激光器. 第 3 节介绍了基于外腔光反馈法的窄线宽半导体激光器研 究进展,包括体全息光栅 (volume holographic grating, VHG)、体布拉格光栅 (volume Bragg grating, VBG)、法布里 – 珀罗腔平面波导、光纤光栅等外腔半导体激光器. 第 4 节做出了总结.



Figure 1 (Color online) Schematic diagram of DFB structure

2 内腔光反馈窄线宽技术

基于内腔光反馈技术的窄线宽半导体激光器通常采用集成布拉格光栅或者特殊波导结构的方案, 集成布拉格光栅方案按照其分布位置的不同可分为分布布拉格反射半导体激光器和分布反馈半导体 激光器,特殊波导方案如耦合腔半导体激光器等.

因此,具有紧凑结构的高功率窄线宽半导体激光器是目前各国研究人员的关注热点,并且对提高 空间探测能力和空间通信能力具有至关重要的作用.其中 DFB 半导体激光器和 DBR 半导体激光器 是实现窄线宽半导体激光器的重要手段.

2.1 分布反馈半导体激光器

分布反馈激光器通常将布拉格光栅结构分布于整个谐振腔中,其主要起到光反馈选模及增益的作用^[8],其结构如图 1 所示.这种激光器具有优越的光谱特性和可高速调制特性等优点,使其广泛应用于高精度探测、光通信等领域^[9]. DFB 激光器的研究开始于 20 世纪 70 年代. 1971 年,美国贝尔实验室^[10]提出了分布反馈激光器的概念,次年他们采用电磁场的耦合模理论分析了 DFB 激光器的工作原理和特性. 1973 年,日本 Nakamura 等^[11]用光泵浦 GaAs 基光栅结构表面,实现了第一只 DFB 激光器.随着半导体外延技术进步,各国研究人员不断开发新的光栅技术,研制出多种多样的新型 DFB 激光器.按照光栅构建方式不同,DFB 激光器可分为两种:(1)在有源区附件构建光栅的二次外延分布反馈 (re-grown DFB, RG-DFB) 半导体激光器;(2) 在外延芯片 P 面光波导表面或者侧壁直接刻蚀 光栅,形成表面光栅分布反馈 (surface grating DFB, SG-DFB) 半导体激光器.

2.1.1 二次外延分布反馈半导体激光器

二次外延分布反馈激光器通常采用二次外延技术: 在 MOCVD 工艺进行到 N 型或 P 型波导层生 长完成时,停止生长工艺并取出一次生长芯片,采用光刻和刻蚀的手段在其 N 型或 P 型波导层上构 建一组低折射率光栅结构,之后将芯片放入外延设备中继续完成生长工艺. 该种二次外延光栅分布在 有源区附近,有利于光栅与光模式场的高效耦合,可有效降低散射损耗,提高耦合效率,实现频率选择 和线宽压缩.

为满足原子光泵浦、原子钟、德布罗意波干涉仪器 (陀螺、重力仪、梯度仪、加速度计) 和全固态 激光器等应用对近红外波段 (760~890 nm) 高功率、窄线宽半导体激光器的需求. 2006 年, 德国费迪 南 · 布劳恩研究所、莱布尼茨高频率技术研究所 (FBH) 采用金属有机气相外延 (MOVPE) 技术, 研制

出室温工作宽条型 DFB 激光器,采用全息光刻和湿法腐蚀技术制备出二阶布拉格光栅,实现激射波 长 808 nm,激光功率 3 W,光谱线宽 0.6 nm (275.7 GHz) 的单纵模激光输出^[12]. 2012~2014 年,该研 究所^[13,14] 采用二次外延技术报道了 780 nm 波段的脊形波导 RG-DFB 激光器,通过优化谐振腔长度 和光栅耦合系数,获得了波长 780 nm 线宽 35 kHz@279 mW 的激光输出.

为满足铯原子的 D1 和 D2 线泵浦所需的 894 和 852 nm 半导体激光源, 法国 III-V 实验室^[15,16] 提 出采用二次外延技术的大光腔结构 DFB 激光器, 获得了激光波长 852 nm, 激光功率 110 mW@50 mA, 边模抑制比超过 50 dB, 洛伦兹线宽仅为 200 kHz, 可满足 Cs 原子 D2 线泵浦需求. 2016 年, 该实 验室联合瑞士纽夏特大学 (University of Newcastle, Switzerland) 提出一种脊形波导 DFB 激光器, 采 用 MOVPE 二次外延技术在 P 面包覆层中构建一组 50 nm 厚的 InGaAsP 光栅 (周期为 273.5 nm), 实现腔长 1.5 mm、宽度 4 μ m 的脊形波导 DFB 激光器, 获得激光波长 894.4 nm@66.4°C、激光线宽 797 kHz、激光功率 40 mW@160 mA、SMSR 超过 50 dB^[17], 可满足原子钟设备中 Cs 原子的 D1 线泵 浦需求.

为满足相干光通信、光纤通信等应用对 1064 和 1550 nm 波段的窄线宽、高效率半导体激光器的 需求, 2010 年,德国 FBH 研究所^[18] 采用二次外延技术构建了耦合系数为 2 cm⁻¹ 的二阶光栅结构,研 制出 1064 nm 波段脊形波导 DFB 激光器,实现了激光功率 150 mW,同时获得最小固有线宽 22 kHz. 随后,法国 III-V 实验室^[19] 采用非对称包层外延结构和稀释波导技术,研制出 1500 nm 波段 DFB 半导体激光器,实现激光功率 180 mW@25°C,并且通过温度调节实现了 9.7 nm 的调谐范围, SMSR> 55 dB,相对强度噪声 (RIN) < 160 dB/Hz,线宽小于 300 kHz.

2.1.2 表面光栅分布反馈半导体激光器

随着半导体外延生长技术和刻蚀技术的进步^[20],尤其是电感耦合等离子刻蚀技术日趋完善,研究 人员越来越关注基于等离子体深刻蚀技术表面光栅分布反馈半导体激光器的研究工作. SG-DFB 激光 器根据光栅构建区域不同,可分为大面积光栅分布反馈 (large-area grating DFB, BA-DFB) 激光器和 侧向耦合分布反馈 (laterally coupled DFB, LC-DFB) 激光器,这两种激光器分别在外延芯片 P 面波导 表面和波导侧壁构建深刻蚀 (≥ 1 µm) 表面光栅,可保证波导内的光模式场与光栅充分耦合反馈,利用 散射效应抑制高阶模式,实现波导中单模振荡,达到选择频率和降低激光线宽的目的,又可有效避免 二次外延技术可能引入的芯片结构缺陷,提高芯片的可靠性和成品率,简化 DFB 激光器制备工艺,实 现高可靠性的窄线宽激光输出.这两种激光器的研制难点是光栅结构的设计与制备,要充分考虑光栅 周期、宽度、深度等结构参数对激光器性能的影响,同时需要高精度刻蚀技术的配合,才能获得理想的 激光器件.

芬兰坦佩雷理工大学 (Tampere University of Technology) 的 Dumitrescu 等^[21] 报道了一种基于 紫外纳米压印技术的 LC-DFB 激光器, 研制了 894 nm 波长 LC-DFB 激光器, 实现了功率 9 mW, 线宽 878 kHz@180 mA, 边模抑制比 35 dB 的窄线宽激光, 器件性能接近同期二次外延 DFB 激光器, 是一种 理想的低成本 DFB 激光器技术方案, 该技术使得 LC-DFB 更易于集成至大规模光电器件中. 2018 年, 芬兰坦佩雷大学的 Virtanen 等^[2] 提出一种窄线宽 DFB 激光器, 采用纳米压印技术制备出三阶侧向 表面光栅结合脊形波导结构, 获得了波长 780 nm, 激光功率为 28.9 mW@300 mA, SMSR > 40 dB, 线 宽 < 10 kHz 的窄线宽输出, 该技术适用于制造低成本小型化原子钟泵浦模块.

1550 nm 波段高功率、窄线宽单模 DFB 半导体激光器在激光雷达、自用空间通信等应用方向有着 巨大的潜力.为了简化 1550 nm 波段 DFB 激光器的研制过程, 2012 年,英国格拉斯哥大学 (University of Glasgow)^[22] 报道了一种新型侧向耦合 DFB 激光器,采用 DFB-LD, Curved WG 和 Tilt flared WG 相 结合的技术手段,研制出了窄线宽侧向耦合集成锥形半导体放大器 DFB 激光器,实现了波长 1550 nm, 功率为 210 mW,线宽仅为 64 kHz, SMSR 大于 45 dB 的激光输出. 2015 年,中国科学院半导体研究所 刘建国团队^[4] 报道了基于单片集成非对称相移 DFB 激光器开发的窄线宽激光器模块,实现激光波长 为 1550 nm,最大输出功率 26 mW@200 mA,最窄激光线宽达到 35 kHz@150 mA.

2013~2014 年, 加拿大渥太华大学 (University of Ottawa) 的 Dridi 等 ^[23~25] 采用步进式光刻技术 在沿脊形波导侧壁上制备出三阶光栅结构, 研制多种 N 段电极侧向耦合 DFB 激光器, 获得了中心波 长为 1560 nm, SMSR > 52 dB, 波长调谐范围 \geq 3 nm, 输出功率 \geq 6 mW, 窄线宽小于 170 kHz@25°C 的单模激光输出.

为了进一步降低侧向耦合 DFB 半导体激光器的光谱线宽,国外研究人员提出基于量子点激光芯 片的 DFB 激光器的技术方案. 2016 年,德国卡塞尔大学 Bjelica 团队^[1]提出一种高质量量子点激光 器生长技术,结合传统 DFB 光栅耦合谐振腔结构,研制出激光线宽仅为 10 kHz,输出功率 12 mW 的 QD-DFB 激光器. 2018 年,法国巴黎 – 萨克雷大学 (Université Paris-Saclay)^[26]报道了一种新型 InAs/InP 量子点 DFB 半导体激光器,其具有反转因子低、线宽增强因子低等特性,可获得低温度敏 感的窄线宽 (160 kHz) 激光输出,同时采用双面敷涂减反膜设计,提高激光功率 (4 mW),并抑制空间 烧孔现象.

为了获得单纵模的激光输出特性和提高光束质量, 2012 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王立军课题组^[27] 报道了采用二阶金属光栅结构的 940 nm 波长宽条 DFB 半导体激光器, 实现激光功率 400 mW, 光谱线宽为 0.09 nm (30.5 GHz), 远场发散角为 2.7°. 2013 年, 中国科学院半导体研究所^[28] 报道了 1.82 μm 波段 InGaAs/InGaAsP 多量子结构 DFB 激光器, 其 SMSR 为 49.53 dB. 1060 nm 波段窄线宽半导体激光器可以应用于激光显示应用方向, 它可以作为产生二次谐波的泵浦源. 2014 年, 中国科学院半导体研究所^[29,30] 报道腔长为 1 mm 的 1060 nm 波段新型波导结构二阶光栅 DFB 激光器, 在注入电流为 350 mA 的条件下, 其功率为 150 mW, SMSR 达 50 dB.

目前 DFB 半导体激光器主要研究 RG-DFB 激光器以及 SG-DFB 激光器这两种结构. 这两种结构的共同点都是将布拉格光栅结构分布于整个谐振腔中, 其主要起到光反馈选模及增益的作用. RG-DFB 激光器通常采用二次外延技术在 N 型或 P 型波导层生长完成后, 采用光刻和刻蚀的手段在其 N 型或 P 型波导层上构建一组低折射率光栅结构, 之后将芯片放入外延设备中继续完成生长工艺. 这种二次外延光栅分布在有源区附近, 有利于光栅与光模式场的高效耦合, 可有效降低散射损耗, 提高耦合效率, 实现频率选择和线宽压缩, 但是二次外延技术可能引入芯片结构缺陷, 影响芯片的可靠性和成品率. SG-DFB 激光器是在外延芯片 P 面光波导表面或者侧壁直接刻蚀光栅, 形成表面光栅分布反馈半导体激光器, 可保证波导内的光模式场与光栅充分耦合反馈, 利用散射效应抑制高阶模式, 实现波导中单模振荡, SG-DFB 的研制难点是光栅结构的设计与制备, 要充分考虑光栅基本参数对激光器性能的影响.

2.2 分布布拉格反射半导体激光器

分布布拉格反射激光器 (示意图如图 2 所示)的谐振腔通常由集成于端面的反射光栅结构和增益 区构成,其与法布里 – 珀罗 (F-P) 腔类似,在增益区的一端或两端构建无源布拉格光栅代替 F-P 激光 器的一端或者两端腔面反射镜,光栅结构仅起到反射镜的作用,由于光栅结构对满足布拉格条件的光 模式具有极强的反射作用,因此可以通过对光栅区的耦合系数进行优化,获得理想的最大反射率和反 射谱宽度,实现 DBR 激光器的单纵模、窄线宽工作.



图 2 (网络版彩图) DBR 激光器示意图 Figure 2 (Color online) Schematic diagram of DBR laser

在自由空间相干光通信等应用中, 需要 1064 nm 波段的窄线宽半导体激光器光源. 2010 年德国 FBH 研究所^[31] 采用 6 阶表面布拉格光栅, 研制了 4 μm 条宽、4 mm 腔长的 1064 nm 波段 DBR 结 构激光器, 实现了线宽为 180 kHz@180 mW, 测出固有线宽为 2 kHz, 阈值电流为 65 mA@25°C, 斜率 效率为 0.41 W/A@25°C.

针对高性能光纤激光器对 975 nm 波段窄线宽半导体激光泵浦源的需求,美国伊利诺伊大学 (University of Illinois) 的 Coleman 等^[32] 采用在宽条波导 (40 μm) 表面刻蚀光栅的方法,研制出腔长 1.5 mm 的 974.8 nm 波段 DBR 激光器,实现激光功率 500 mW,激光线宽 350 kHz, SMSR > 40 dB 的 高功率输出. 随后,德国 FBH 研究所^[33] 采用普通紫外光刻和反应等离子体刻蚀技术制备出 80 阶表面 光栅 DBR 激光器,在 970 nm 波段实现激光功率 6 W,电光转化率 > 50%,光参量积 < 1.8 mm×mrad,激光线宽仅为 0.41 nm (130.7 GHz),十分适用于泵浦光纤激光器.

窄线宽红光激光器 (620~650 nm 波段) 是激光光谱学、相干测量和全息技术的重要光源, 针对这 一需求, 德国 FBH 研究所^[34] 提出一种 633 nm 波段的窄线宽 DBR 激光器, 激光器谐振腔总长 2 mm, 其中脊形增益区为 1.5 mm、光栅区为 0.5 mm, 实现了激光功率 10 mW@150 mA, 光谱线宽 < 1 MHz 的输出, 可连续工作 1700 h@14 mW. 随后, 该研究所的 Paschke 等^[35] 报道了一种脊型波导 DBR 激 光器, 通过步进光刻和反应离子刻蚀在激光结构中引入光栅, 研制出波长为 626.5 nm 的 DBR 激光器, 实现输出功率 > 50 mW@ 0°C, 激光线宽 < 1 MHz@150 mA, SMSR > 20 dB, 该技术可替代传统全固 态激光器作为量子信息实验光源, 通过降低光源模块体积, 可有效提升量子信息系统的微型化程度.

550~620 nm 波段黄光激光在大气测量、生物医学领域具有广泛应用,而目前黄光产生主要采用 1180 nm 波段 LD 泵浦全固态激光器的方案.为满足该种需求,芬兰坦佩雷理工大学^[36]提出一种宽 调谐 DBR 激光器,采用三阶表面梯形光栅结合脊形波导结构设计,避免了二次外延生长问题,同时 提高器件边模抑制比,实现了激光线宽 < 250 kHz,功率 > 500 mW, SMSR 超过 50 dB, 持续工作 2000 h 无退化的高性能激光输出.

目前窄线宽分布布拉格反射半导体激光器主要采用表面 Bragg 光栅结构作为反射镜实现频率选择作用,通过合理设计光栅结构参数,获得理想的光栅反射率、反射率半宽和光栅中光波相位变化等光电特性,实现窄线宽输出的 DBR 半导体激光器. 这种表面 DBR 激光器相比于传统的多次外延 DBR 激光器的优势就是避免了不同区位波导间耦合效率低下的问题,降低了制备工艺复杂程度,提高 了 DBR 激光器的应用价值.

2.3 耦合腔半导体激光器

20 世纪 80 年代,美国贝尔实验室的研究人员提出耦合腔激光器,其利用一个或多个深槽将两段 或多段谐振腔耦合起来的激光器,实现单模激光输出.最初采用分离式结构,将两个腔面距离极近的 F-P 腔激光器焊接到同一热沉上,此时芯片间隙相当于一个深刻蚀槽,通过这个槽的耦合作用,实现线 宽 500 kHz 的窄线宽激光^[37].之后,爱尔兰布拉纳光电公司 (Branna Electronics Company)、都柏林 大学、格拉斯哥大学、浙江大学等机构的研究人员将该结构进一步改进,分别研制出基于单刻蚀槽和 周期性刻蚀槽的耦合腔激光器,都获得了理想的窄线宽激光输出.

2011 年,爱尔兰布拉纳光电公司联合瑞士纽夏特大学^[38]提出一种分离模式半导体激光器,通过 在脊形波导上刻蚀多个深槽引入折射率微扰,进而增强一个 F-P 模式,损耗其他模式,获得单纵模激 光输出,实现激光波长 780 nm,光谱线宽仅为 2 MHz.在此基础上,爱尔兰布拉纳光电公司和都柏 林城市大学 (Dublin City University)^[39]联合研制出一种宽工作温区的分离模式半导体激光器,实现 在 0°C < T < 85°C 温度范围内保持单纵模工作,激光线宽 < 250 kHz, SMSR 达 40 dB,输出功率约 4 mW. 2018 年,该公司^[40]又报道了一种单片集成单模红光半导体激光器,采用分离模式结构实现激 光波长 689 nm,激光功率 10 mW, SMSR 达 40 dB,光谱线宽 2 MHz,在 0°C ~ 50°C 内保证无跳模 输出.

2014 年, 爱尔兰都柏林大学的 Abdullaev 等^[41] 报道了一种弯曲波导 slot-DBR 单模激光器, 实现 了洛伦兹线宽为 720 kHz@160 mA, SMSR 为 50 dB 的稳定单模输出. 2017 年, 爱尔兰廷德尔国家研 究院 (Tyndall National Institute) 的 Yang 等^[42] 提出一种新型多模干涉波导 (multimode interference waveguide, MMI) 激光器, 通过将 1×2 MMI 与泪珠形反射波导耦合, 在环形波导半径为 150 μm 的情 况下, 实现了 1562.5 nm 波段的单模激发, 线宽为 75 KHz@25°C, SMSR 为 30 dB.

为满足光通信领域对低成本 1550 nm 波段半导体激光芯片的需求,都柏林圣三一大学 (Trinity College Dublin)^[43]提出一种基于 Slot 光栅结构的耦合腔半导体激光器,在 1569 nm 波段实现边模抑制比 > 50 dB 的单纵模激射.浙江大学何建军教授课题组^[44~46]采用深刻蚀 slot-F-P 腔工艺技术,开发了多种窄线宽耦合腔半导体激光器,其线宽仅为 80 kHz, SMSR 为 38 dB.

3 外腔光反馈窄线宽技术

基于外腔光反馈技术的窄线宽半导体激光器 (external cavity optical feedback technology, ECL), 是一种采用外部光学元件对半导体激光芯片的出射光进行反馈和选频,增加谐振腔有效长度,提高激 光器谐振腔的品质因子 Q 值,降低激光线宽,又因其采用无源光学元件进行频率选择和光反馈,更容 易实现低相位噪声和高温度稳定性,是空间相干通信、相干探测、高精度传感等应用领域的理想光源.

ECL 可有效避免内腔集成光栅的光波衍射与散射损耗,但是其对外部光学选频元件耦合光路与 工作环境的稳定性要求较高,其中外部光学选频元件作为 ECL 的核心装置,主要包括:(1)采用激光 全息技术在特殊光敏玻璃中制作的体全息光栅、体布拉格光栅等衍射光栅元件;(2)低损耗 F-P 波导、 镀膜反射镜及采用飞秒激光技术加工的光纤光栅波导等波导型反馈元件.

3.1 外腔光栅反馈半导体激光器

选用衍射光栅作为反馈元件的外腔激光器通常会采用 Littrow 或 Littman 结构^[47],这两种结构 外腔激光器的谐振腔通常由半导体激光芯片、光学透镜或反射镜、闪耀光栅或者全息光栅等光学元件



图 3 (网络版彩图) Littrow 结构 (a) 和 Littman 结构 (b) 外腔半导体激光器结构示意图 Figure 3 (Color online) Two principal designs of the external cavity tunable systems with bulk diffraction gratings: (a) Littrow configuration and (b) Littman (grazing-incidence) configuration

构成,其结构示意图如图 3 所示. Littrow 结构 ECL 通常由半导体芯片、光学透镜和衍射光栅构成, 通过改变光栅角度 θ,使某一特定波长光波反馈回半导体激光芯片,大幅提高其余波长光波的衍射损 耗,同时改变谐振腔整体长度,实现波长稳定的窄线宽激光输出. Littman 结构 ECL 通常由半导体芯 片、光学透镜、衍射光栅和反射镜构成,其中反射镜起到调谐器作用,光栅固定不动,通过改变反射镜 角度,将入射光沿入射光路返回,光波经过光栅二次衍射后,边模抑制比大幅提高,激光线宽进一步窄 化,但其结构比 Littrow 结构 ECL 复杂,导致功率损耗大,不易于实现高功率输出.

由于 Littrow 结构外腔半导激光器在获得窄线宽输出的同时,可获得相对较高的输出功率,引起 了科研人员的广泛关注,德国汉诺威大学 (Universität Hannover)、耶拿大学 (Universität Jena)^[48]、 土耳其苏莱曼 · 德米雷尔大学 (Suleiman Demirel University of Turkey)、澳大利亚国立大学 (Australian National University) 等多家科研机构对其进行了研究报道. 2016 年,澳大利亚国立大学的 Shin 等^[49]提出采用单边倾斜出光的增益芯片和闪耀光栅 (1200 线/mm)构成 Littrow-ECL,实现输出功率 300 mW@600 mA,在 1080 nm 波段附近 100 nm 范围的宽调谐,洛伦兹线宽 4.2 kHz@22.5 ms,同时获 得优良的波长稳定性 (40 kHz@11 h).同年,土耳其苏莱曼 · 德米雷尔大学^[50]采用一种 side-of-fringe 稳定技术,实现了频率主动稳定 ECL,其波长调谐范围为 60 nm (1000~1060 nm),线宽由 160 KHz 窄 化为 400 Hz.随后,苏莱曼 · 德米雷尔大学^[51]又创新性地采用超低腔面反射率 (0.005%)的增益芯片 结合双 Littrow 结构实现一种双纵模激射 ECL,获得 120 nm (覆盖 1470~1590 nm)的波长调谐范围, 这种双波长光源适用于光传感、太赫兹波源、成像、双波长干涉仪、光开关、波分复用等应用领域.

北京大学、厦门大学、华中科技大学和中国科学院上海光学精密机械研究所^[52]等国内机构也对 Littrow 结构 ECL 开展了深入研究. 2007 年,北京大学陈文兰等^[53]采用商用半导体激光管构建了一 个 Littrow-ECL,在 780 nm 波段获得线宽 < 1 MHz,连续调谐范围 > 3 GHz,同时实现稳定度提升至 10~12 量级. 2017 年,厦门大学的车凯军课题组^[54]报道了一种利用光栅线与 GaN 基增益芯片节平 面平行构建 Littrow 结构 ECL,实现激光线宽由 1 nm 降低至 0.1 nm (151 GHz),放大自发辐射抑制 比达 35 dB,同时实现输出功率为 1.24 W,可调谐带宽 3.6 nm (443.9 ~ 447.5 nm),中心波长的外腔耦 合效率达 80% 的高功率蓝光激光.同年,华中科技大学的左都罗团队^[55]报道了一种窄线宽更窄的蓝 光 Littrow-ECL,实现最大激光功率 500 mW,激光线宽 50 pm (75.7 GHz),可调谐范围达 2 nm, SMSR 超过 20 dB.

为实现激光线宽的进一步窄化,中国科学院上海光学精密机械研究所、中国计量科学研究院等国 内单位开展了 Littman 结构外腔半导体激光器研究. 2009 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 蔡海文团队^[56]研究了一种 Littman-Metcalf 结构外腔半导体激光器的偏振特性,通过旋转 LD 芯片, 改变 LD 光束横向电场方向与光栅线之间的夹角来表征 ECL 的偏振特性. 该团队发现: 当 LD 横向





电场方向与光栅线槽平行时, ECL 输出激光束呈线偏振特性, 线极化率为 100; 当 LD 横向电场方向 与光栅线槽出现夹角时, ECL 输出激光束呈左椭圆偏振状态. 同时提出了 ECL 输出光束偏振态方程, 既为高偏振性能 ECL 的研究提供了理论支持, 又有助于开发具有圆形或椭圆形偏振输出的 ECL 激光 器. 2012 年, 中国计量科学研究院的赵阳等^[5] 报道了一种新型 100-Hz 量级窄线宽外腔半导体激光器, 采用高精度双镜式非共焦腔 Littman 结构, 成功降低 ECL 的激光线宽至 100 Hz, 瞬时洛伦兹线宽降 低至 30 Hz, 激光相位噪声被显著抑制到 50 dB.

在 Littrow 结构和 Littman 结构外腔激光器之外,还有直接采用体光栅 (体全息光栅体和体布 拉格光栅) 作为光反馈元件的外腔激光器. 2009 年,芬兰赫尔辛基理工大学 (Helsinki University of Technology) Hieta 等^[57] 报道了基于体全息光栅的长腔长外腔半导体激光器,其总腔长达 68 mm,谐振腔长度增加至 15 mm,使得其品质因子 Q 大幅提高,结合 VHG 的选频作用,实现 635 nm 波段高斯线宽 900 kHz,边模抑制比达 35 dB. 2013~2017 年,德国 FBH 研究所联合洪堡大学 (Humboldt University)^[58,59] 针对 780 和 1064 nm 波段体全息布拉格光栅 (VHBG) 外腔激光器开展了大量研究,开发了 ECDL-MOPA 激光器模块,实现输出功率 575 mW@1.5A,激射波长 1064.49 nm,光谱线宽 FWHM 30 kHz, SMSR > 45 dB.

3.2 外腔波导反馈半导体激光器

基于外腔波导反馈技术的窄线宽激光器,主要通过耦合外部低损耗波导或光纤光栅波导 (如图 4 所示),增加激光器谐振腔的长度,提高激光器谐振腔的品质因子 Q 值,达到降低激光器线宽的目的, 在实现窄线宽激光输出具有良好的表现.

采用外部低损耗波导作为光反馈元件可有效降低半导体激光器线宽,并获得低噪声光谱特性. 美国马里兰大学 (University of Maryland) 和雷德芬集成光学公司 (Redfin Integrated Optics Company)^[60] 合作开发出一种平面波导型外腔激光器 (PW-ECL),可显著降低 ECL 的频率噪声和强度噪声,获得 1542 nm 波段的窄线宽 (2 kHz) 输出,同时激光功率达 10 mW. 同一时期,中国计量科学研究院^[61] 也报道了一种采用集成法布里 – 珀罗腔 (MFC) 代替传统外腔反射镜,实现 ECL 光谱线宽仅为 6.8 kHz.

随着硅基光子学的发展,研究人员开始关注采用硅基低损耗波导为反馈元件的外腔半导体激光技术. 2015 年,美国加州大学圣巴巴拉分校 (University of California, Santa Barbara)^[62]提出一种宽调

谐、窄线宽单片集成外腔半导体激光器,采用腔长为 4 cm 的低损耗硅基波导作为光反馈元件,通过控制外腔元件的光反馈,在 O 波段实现 54 nm 的宽调谐范围,同时显著降低激光器线宽,在调谐范围内均低于 100 kHz,最低线宽可达到 50 kHz. 2017 年,美国康奈尔大学 (Cornell University) 和哥伦比亚大学 (Columbia University)^[63]联合报道了一种基于低损耗硅基环形波导结构的外腔激光器,利用高Q 值微型谐振腔的窄带反射特性,同时采用环形波导可避免光模式反馈,获得激射波长 1550 nm,激光线宽 13 kHz,输出功率 1.7 mW.

为获得更低噪声的外腔激光器, 普林斯顿大学、德国 FBH 研究所、日本东北大学等研究机构采用外腔晶体作为光反馈元件, 实现低噪声输出. 2010 年, 普林斯顿大学^[64] 采用 ZnSe 楔形晶体作为半反射器提供光反馈, 实现单纵模激光输出 (功率达 40 mW), 线宽仅为 480 kHz. 随后, 德国 FBH 研究 所^[3] 提出利用 DFB 激光芯片与集成式共焦法布里 – 珀罗腔谐振器等组成共振反馈谐振腔, 实现功率为 50 mW, 洛伦兹线宽仅 15.7 Hz, 同时获得超低噪声 (白噪声等级 5 Hz²/Hz) 输出, 其噪声水平比普通 DFB 激光器和外腔激光器分别低了 5 个和 3 个数量级. 2015~2018 年, 日本东北大学 Konosuke Aoyama 团队^[65,66]提出一种相干光学负反馈方法降低单模半导体激光器线宽, 利用外腔负反馈镜片将激光器线宽由 13.5 MHz 优化为 3 kHz, 频率调制 (FM) 噪声的能量密度降低 35 dB, 同时相对强度 噪声低于 –140 dB/Hz, 该系统可以保持窄线宽稳定输出超过一小时.

近年来,中国科学院上海光学精密机械研究所^[67,68]、中国科学院半导体研究所^[69,70]等多家国内研究机构对光纤波导外腔半导体激光器逐渐开展研究,采用光纤光栅波导反馈技术将半导体激光器的激光线宽进行窄化至 10 kHz.其中,中国科学院上海光学精密机械研究所杨飞等^[67]报道了一种基于布拉格光栅法布里 – 珀罗腔光纤波导结构的 1550 nm 波段自注入锁定 ECL,实现了亚 kHz 固有线宽 (洛伦兹线宽 125 Hz),同时相对强度噪声 < -142 dBc/Hz.中国科学院半导体研究所^[69]报道了一种基于光纤波导的双循环自注入压缩线宽的方法,成功研制出一种宽调谐 DBR 激光器,光谱调谐范围达 13 nm (覆盖 18 个信道), SMDR > 38 dB,线宽均 < 10 kHz,达到国际领先水平.

目前外腔反馈结构半导体激光器的研究主要包括: Littrow 型或 Littman 型衍射光栅反馈外腔半导体激光器和基于低损耗波导和光纤光栅波导结构的外腔波导反馈半导体激光器. 这两种外腔反馈激光器都是采用外部光反馈元件实现激光频率的选择和线宽的压缩, 线宽水平都能达到 kHz 量级. 而外腔光栅反馈半导体激光器的优势就是通过调整光栅位置就能实现波长调谐, 同时由于光路耦合效率高, 更易于实现高功率输出, 应用前景更加广阔.

4 总结与展望

半导体激光器正向着高功率、窄线宽的方向快速发展,内腔反馈技术方面,通过激光芯片外延结构和波导结构的分别优化设计,获得低于 10 kHz 的窄线宽激光输出;外腔反馈技术方面,通过不断开发新型光反馈元件和光学谐振腔设计,实现低于 100 Hz 的超窄线宽激光,结合其体积小、重量轻、高转换效率、光谱范围广等特性,将在超高精度激光雷达、卫星间通信、相干光通信、激光光谱学、原子钟泵浦、大气吸收测量及光纤通信等领域获得极其广泛的应用.

目前,我国在窄线宽半导体激光器研究领域,由于起步较晚、工艺技术限制及国外的高端技术封 锁等因素,与国外仍有一定差距,需要进一步提高半导体激光器的功率和光谱特性;解决二次高质量 外延生长技术和表面光栅的高深宽比刻蚀技术;攻克高精度光栅等光学反馈元件制造关键技术;亟待 整合国内优势单位进行联合研发,突破关键技术,实现高功率、窄线宽半导体激光器的自主化研发.

参考文献 -

- Bjelica M, Witzigmann B. Optimization of 1.55 μm quantum dot edge-emitting lasers for narrow spectral linewidth. Opt Quant Electron, 2016, 48: 110
- 2 Virtanen H, Uusitalo T, Karjalainen M, et al. Narrow-linewidth 780-nm DFB lasers fabricated using nanoimprint lithography. IEEE Photon Technol Lett, 2018, 30: 51–54
- 3 Lewoczko-Adamczyk W, Pyrlik C, Häger J, et al. Ultra-narrow linewidth DFB-laser with optical feedback from a monolithic confocal Fabry-Perot cavity. Opt Express, 2015, 23: 9705–9709
- 4 Liu J G, Wang S L, Chen W. Narrow linewidth distributed-feedback laser with low relative intensity noise. In: Proceedings of the 14th International Conference on Optical Communications and Networks, Nanjing, 2015. 1–3
- 5 Zhao Y, Li Y, Wang Q, et al. 100-Hz linewidth diode laser with external optical feedback. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24: 1795–1798
- 6 Jia P, Qin L, Chen Y Y, et al. Broad-stripe single longitudinal mode laser based on metal slots. Opt Commun, 2016, 365: 215–219
- 7 Chen Y Y, Jia P, Zhang J, et al. Gain-coupled distributed feedback laser based on periodic surface anode canals. Appl Opt, 2015, 54: 8863–8866
- 8 Klehr A, Schwertfeger S, Wenzel H, et al. Dynamics of high power gain switched DFB RW laser under high current pulse excitation on a nanosecond time scale. In: Proceedings of SPIE-the International Society for Optics and Photonics (OPTO), San Francisco, 2013. 86401N
- 9 Hai Y N, Zhou Y G, Tian K, et al. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers. Chin Opt, 2017, 10: 194–206
- 10 Kogelnik H, Shank C V. Erratum: stimulated emission in a periodic structure. Appl Phys Lett, 1971, 18: 408
- 11 Nakamura M, Yariv A, Yen H W, et al. Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback. Appl Phys Lett, 1973, 22: 515–516
- 12 Klehr A, Bugge F, Erbert G, et al. High-power broad-area 808nm DFB lasers for pumping solid state laser. In: Proceedings of Conference on Novel In-Plane Semiconductor Lasers V, San Jose, 2006. 61330F
- 13 Nguyen T P, Schiemangk M, Spießberger S, et al. Optimization of 780 nm DFB diode lasers for high-power narrow linewidth emission. Appl Phys B, 2012, 108: 767–771
- 14 Brox O, Bugge F, Mogilatenko A, et al. Small linewidths 76x nm DFB-laser diodes with optimised two-step epitaxial gratings. In: Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, Brussels, 2014. 9134
- 15 Cayron C, Tran M, Robert Y, et al. Very narrow linewidth of high power DFB laser diode for Cs pumping. In: Proceedings of 2011 Conference on Lasers and Electro-optics Europe, Munich, 2011. 1–2
- 16 Cayron C, Tran M, Robert Y, et al. High power distributed feedback and Fabry-Perot Al-free laser diodes at 780 nm for rubidium pumping. In: Proceedings of Conference on Novel In-Plane Semiconductor Lasers X, San Francisco, 2011. 79530A
- 17 Matthey R, Gruet F, Affolderbach C, et al. Development and spectral characterisation of ridge DFB laser diodes for Cs optical pumping at 894 nm. In: Proceedings of 2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), Univ York, 2016. 1–4
- 18 Spießberger S, Schiemangk M, Wicht A, et al. Narrow linewidth DFB lasers emitting near a wavelength of 1064 nm. J Lightw Technol, 2010, 28: 2611–2616
- 19 Faugeron M, Tran M, Parillaud O, et al. High-power tunable dilute mode DFB laser with low RIN and narrow linewidth. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25: 7–10
- 20 Hou C C, Chen H M, Zhang J C, et al. Near-infrared and mid-infrared semiconductor broadband light emitters. Light Sci Appl, 2017, 7: 17170
- 21 Dumitrescu M, Telkkala J, Karinen J, et al. Narrow-linewidth distributed feedback lasers with laterally-coupled ridgewaveguide surface gratings fabricated using nanoimprint lithography. In: Proceedings of Conference on Novel In-plane Semiconductor Lasers X, San Francisco, 2011. 79530B
- 22 Hou L P, Haji M, Akbar J, et al. Narrow linewidth laterally coupled 1.55 μm AlGaInAs/InP distributed feedback lasers integrated with a curved tapered semiconductor optical amplifier. Opt Lett, 2012, 37: 4525–4527
- 23 Dridi K, Benhsaien A, Akrout A, et al. Narrow-linewidth three-electrode regrowth-free semiconductor DFB lasers with uniform surface grating. In: Proceedings of Conference on Novel In-Plane Semiconductor Lasers XII, San Francisco,

2013.864009

- 24 Dridi K, Benhsaien A, Zhang J, et al. Narrow linewidth 1550 nm corrugated ridge waveguide DFB lasers. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26: 1192–1195
- 25 Dridi K, Benhsaien A, Zhang J, et al. Narrow linewidth two-electrode 1560 nm laterally coupled distributed feedback lasers with third-order surface etched gratings. Opt Express, 2014, 22: 19087–19097
- 26 Duan J N, Huang H M, Lu Z G, et al. Narrow spectral linewidth in InAs/InP quantum dot distributed feedback lasers. Appl Phys Lett, 2018, 112: 121102
- 27 Shi J X, Qin L, Liu Y, et al. Emission characteristics of surface second-order metal grating distributed feedback semiconductor lasers. Chin Sci Bull, 2012, 57: 2083–2086
- 28 Yu H Y, Pan J Q, Shao Y B. 1.82-µm distributed feedback lasers with InGaAs/InGaAsP multiple-quantum wells for a H2O sensing system. Chin Opt Lett, 2013, 11: 031404–031407
- 29 Zhai T, Tan S Y, Lu D, et al. High power 1060 nm distributed feedback semiconductor laser. Chin Phys Lett, 2014, 31: 024203
- 30 Guo F, Zhang R K, Lu D, et al. 1.3-µm multi-wavelength DFB laser array fabricated by mocvd selective area growth. Opt Commun, 2014, 331: 165–168
- 31 Spießberger S, Schiemangk M, Wicht A, et al. DBR laser diodes emitting near 1064 nm with a narrow intrinsic linewidth of 2 kHz. Appl Phys B, 2011, 104: 813–818
- 32 Coleman J J, Dias N L, Reddy U, et al. Narrow spectral linewidth surface grating DBR diode lasers. In: Proceedings of the 23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC), San Diego, 2012. 173–174
- 33 Decker J, Crump P, Fricke J, et al. Narrow stripe broad area lasers with high order distributed feedback surface gratings. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26: 829–832
- Feise D, Blume G, Pohl J, et al. Sub-MHz linewidth of 633 nm diode lasers with internal surface DBR gratings.
 In: Proceedings of Conference on Novel In-Plane Semiconductor Lasers XII, San Francisco, 2013. 86400A
- 35 Paschke K, Pohl J, Feise D, et al. Properties of 62x nm red-emitting single-mode diode lasers. In: Proceedings of Conference on Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIII, San Francisco, 2014. 90020A
- 36 Virtanen H, Aho A T, Viheriala J, et al. Spectral characteristics of narrow-linewidth high-power 1180 nm DBR laser with surface gratings. IEEE Photon Technol Lett, 2017, 29: 114–117
- 37 Lee T P, Burrus C A, Wilt D P. Measured spectral linewidth of variable-gap cleaved-coupled-cavity lasers. Electron Lett, 1985, 21: 53–54
- 38 Gruet F, Bandi T, Mileti G, et al. Development and spectral characterisation of Discrete Mode Laser Diodes (DMLDs) emitting at 780 nm for Rubidium atomic clocks. In: Proceedings of 2011 Conference on Lasers and Electro-optics Europe, Munich, 2011. 1–2
- 39 O'Carroll J, Phelan R, Kelly B, et al. Wide temperature range $0^{\circ}C < T < 85^{\circ}C$ narrow linewidth discrete mode laser diodes for coherent communications applications. Opt Express, 2011, 19: 90–95
- 40 Phelan R, Gleeson M R, Byrne D C, et al. InGaP/AlGaInP quantum well discrete mode laser diode emitting at 689 nm. IEEE Photon Technol Lett, 2018, 30: 235–237
- 41 Abdullaev A, Lu Q Y, Guo W H, et al. Linewidth characterization of integrable slotted single-mode lasers. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26: 2225–2228
- 42 Yang H, Yang M Q, Zhao Y, et al. Butterfly packaged ultra-narrow linewidth single frequency teardrop laser diode. IEEE Photon Technol Lett, 2017, 29: 1537–1539
- 43 Lu Q Y, Guo W H, Nawrocka M, et al. Single mode lasers based on slots suitable for photonic integration. Opt Express, 2011, 19: B140
- 44 Zou L, Wang L, Yu T T, et al. Wavelength tunable laser based on distributed reflectors with deep submicron slots.
 In: Proceedings of Conference on Photonics North, Montreal, 2012. 841200
- 45 Wang Y, Yang Y G, Zhang S, et al. Narrow linewidth single-mode slotted Fabry-Pérot laser using deep etched trenches. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24: 1233–1235
- 46 Yu T T, Zou L, Wang L, et al. Single-mode and wavelength tunable lasers based on deep-submicron slots fabricated by standard UV-lithography. Opt Express, 2012, 20: 16291–16299
- 47 Mroziewicz B. External cavity wavelength tunable semiconductor lasers a review. Opto-Electron Rev, 2008, 16: 347–366

- 48 Britzger M, Khalaidovski A, Hemb B, et al. External-cavity diode laser in second-order Littrow configuration. Opt Lett, 2012, 37: 3117–3119
- 49 Shin D K, Henson B M, Khakimov R I, et al. Widely tunable, narrow linewidth external-cavity gain chip laser for spectroscopy between 1.0–1.1 μm. Opt Express, 2016, 24: 27403–27414
- 50 Bayrakli I. Frequency stabilization at the sub-kilohertz level of an external cavity diode laser. Appl Opt, 2016, 55: 2463–2466
- 51 Bayrakli I. Investigation of double-mode operation and fast fine tuning properties of a grating-coupled external cavity diode laser configuration. Opt Laser Tech, 2017, 87: 7–10
- 52 Wei F, Sun Y G, Chen D J, et al. Tunable external cavity diode laser with a PLZT electrooptic ceramic deflector. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23: 296–298
- 53 Chen W L, Yuan J, Qi X H, et al. Design of 780 nm external cavity semiconductor laser and higher harmonic frequency stabilization. Chin J Lasers, 2007, 34: 895–900
- 54 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
- 55 Li B, Gao J, Yu A L, et al. 500 mW tunable external cavity diode laser with narrow line-width emission in blue-violet region. Opt Laser Tech, 2017, 96: 176–179
- 56 Chen D J, Fang Z J, Cai H W, et al. Polarization characteristics of an external cavity diode laser with littman-metcalf configuration. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21: 984–986
- 57 Hieta T, Vainio M, Moser C, et al. External-cavity lasers based on a volume holographic grating at normal incidence for spectroscopy in the visible range. Opt Commun, 2009, 282: 3119–3123
- 58 Luvsandamdin E, Spießberger S, Schiemangk M, et al. Development of narrow linewidth, micro-integrated extended cavity diode lasers for quantum optics experiments in space. Appl Phys B, 2013, 111: 255–260
- 59 Christopher H, Arar B, Bawamia A, et al. Narrow linewidth micro-integrated high power diode laser module for deployment in space. In: Proceedings of IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, Kinawa, 2017. 150–153
- 60 Numata K, Camp J, Krainak M A, et al. Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements. Opt Express, 2010, 18: 22781–22788
- 61 Zhao Y, Peng Y, Yang T, et al. External cavity diode laser with kilohertz linewidth by a monolithic folded Fabry-Perot cavity optical feedback. Opt Lett, 2011, 36: 34–36
- 62 Komljenovic T, Srinivasan S, Norberg E, et al. Widely tunable narrow-linewidth monolithically integrated externalcavity semiconductor lasers. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2015, 21: 1–9
- 63 Stern B, Ji X C, Dutt A, et al. Compact narrow-linewidth integrated laser based on a low-loss silicon nitride ring resonator. Opt Lett, 2017, 42: 4541–4544
- 64 Cendejas R A, Phillips M C, Myers T L, et al. Single-mode, narrow-linewidth external cavity quantum cascade laser through optical feedback from a partial-reflector. Opt Express, 2010, 18: 26037–26045
- 65 Aoyama K, Yoshioka R, Yokota N, et al. Optical negative feedback for linewidth reduction of semiconductor lasers. IEEE Photon Technol Lett, 2015, 27: 340–343
- 66 Aoyama K, Yokota N, Yasaka D H. 3-kHz spectral linewidth laser assembly with coherent optical negative feedback. IEEE Photon Technol Lett, 2018, 30: 277–280
- 67 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
- 68 Zhang L, Wei F, Sun G W, et al. Thermal tunable narrow linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG. IEEE Photon Technol Lett, 2017, 29: 385–388
- 69 Yu L Q, Lu D, Pan B W, et al. Widely tunable narrow-linewidth lasers using self-injection DBR lasers. IEEE Photon Technol Lett, 2015, 27: 50–53
- 70 Li Z S, Lu D, He Y M, et al. Improving the performance of narrow linewidth semiconductor laser through self-injection locking. In: Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE-Photonics-Society (IPC), Orlando, 2017. 655–656

Advances in narrow linewidth diode lasers

Xingkai LANG^{1,2}, Peng JIA^{1*}, Yongyi CHEN^{1*}, Li QIN¹, Lei LIANG¹, Chao CHEN¹, Yubing WANG¹, Xiaonan SHAN¹, Yongqiang NING¹ & Lijun WANG^{1*}

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

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

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

Abstract The era of smart travel has arrived, and the need for high precision lidar detection technology is increasing. With the advantages of high resolution, a strong anti-active jamming ability, small volume, light weight, and low cost, new solid-state lidars can meet the requirements of intelligent cars in the future. A narrow linewidth diode laser is an ideal light source of solid-state lidars. The progress and development of narrow linewidth diode laser techniques can greatly improve the application of solid-state lidars. In this paper, the technology and development is described in detail. In addition, the design ideas, key fabrication technologies, and optical characteristics of various narrow linewidth diode lasers are analyzed and discussed. Finally, the developments of narrow linewidth diode lasers are proposed.

Keywords diode lasers, narrow linewidth, internal cavity optical feedback technology, external cavity optical feedback technology, solid-state lidars



Xingkai LANG was born in 1991. He received his B.S. degree in applied physics from Shandong University, Shandong, China, in 2015. He is currently completing a Ph.D. in condensed matter physics at the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science in Changchun. He is mainly engaged in research on edge-emitting semiconductor lasers.



Peng JIA was born in 1986. He received a Ph.D. degree in condensed matter physics from the University of Chinese Academy of Sciences, Changchun, China, in 2015. He is currently a research assistant professor at the Changchun Institute of Opptics, Fine Mechanics and Physics. His research interests include single mode DBR laser diodes and high beam quality laser diodes.



Yongyi CHEN was born in 1986. He received a Ph.D. degree in condensed matter physics from the University of Chinese Academy of Sciences, Changchun, China in, 2013. He is currently an associate researcher at the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His research interests include high power DFB laser diodes and narrow linewidth DFB laser diodes.



Lijun WANG was born in 1946. He received an M.S. degree in semiconductor physics and device physics from Jilin University, Changchun, China, in 1982. He is currently an academician at the Chinese Academy of Sciences, as well as a Senior Researcher at the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His research interests include semiconductor laser theory, and technology and engineering applications.