

文章编号: 1000-7032(2025)12-2241-24

片上微腔激光器发展概述

刘启发^{1,2,3†}, 曹宇翼^{1†}, 黄 远¹, 李韩哲², 朱刚毅^{1,4*}

(1. 南京邮电大学 波特兰学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

3. 上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;

4. 南京邮电大学 集成电路科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 对不同种类半导体微腔激光器的基本原理、特点、发展及应用进行了综述。分布式反馈(DFB)激光器依靠其布拉格光栅达成稳定的单模输出, 适合应用在高速大容量光通信、硅光子集成等; 回音壁模式(WGM)激光器依靠高品质因子和低阈值特性, 适用于非线性光学以及高灵敏度传感; 垂直腔面发射激光器(VCSELs)有着低功耗与高速调制的良好特性, 应用于短距离传输和人脸识别、激光雷达等消费电子范畴; 波长级有源区掩埋(LEAP)激光器通过优化能源利用效率与集成水平, 加快光子系统的创新升级; 光子晶体面发射激光器(PCSELs)借助二维光子晶体结构达成高功率、低发散角以及高光束质量的输出, 属于新一代的高性能激光源。本文分析了这些激光器的性能与应用场景, 归纳了各自的技术特点, 探讨了今后的发展趋向。

关键词: 微腔激光器; 分布式反馈激光器; 回音壁模激光器; 垂直腔面发射激光器; 光子晶体激光器

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

DOI: 10.37188/CJL.20250166 **CSTR:** 32170.14.CJL.20250166

Development Overview of On-chip Microcavity Lasers

LIU Qifa^{1,2,3†}, CAO Yuyi^{1†}, HUANG Yuan¹, LI Hanzhe², ZHU Gangyi^{1,4*}

(1. Portland Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. College of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

4. College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhugangyi@njupt.edu.cn

Abstract: This paper reviews the basic principles, characteristics, research trends and applications of various types of semiconductor lasers. Distributed feedback (DFB) lasers, with their Bragg gratings, achieve stable single-mode output and are suitable for high-speed and high-capacity optical communication, silicon photonics integration. Whispering gallery mode (WGM) lasers, with their high-quality factor and low threshold characteristics, are ideal for nonlinear optics and high-sensitivity sensing. Vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs), known for their low power consumption and high-speed modulation, are applied in short-distance transmission, facial recognition, LiDAR and other consumer electronics. Lambda-scale embedded active region photonic crystal (LEAP) lasers drive the innovation of photonic systems by optimizing energy efficiency and integration. And the photonic crystal surface emitting lasers (PCSELs), with their 2D photonic crystal structure, provide high-power, low divergence angle

收稿日期: 2025-06-13; 修订日期: 2025-06-30

基金项目: 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2023GZKF018); 江苏省研究生科研创新计划(KYCX24_1199, SJCX24_0286); 南京邮电大学科学基金(NY224125)

Supported by Open Fund of State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks(2023GZKF018); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX24_1199, SJCX24_0286); Natural Science Foundation of Nanjing University of Posts and Telecommunications(NY224125)

†: 共同贡献作者

and high beam quality output. This makes it to be the most promising new generation high-performance laser source. By analyzing the performance and application scenarios of these lasers, this paper summarizes the technical properties of each and discusses future development directions.

Key words: microcavity lasers; distributed feedback lasers; whispering gallery mode lasers; vertical cavity surface emitting lasers; photonic crystal lasers

1 引 言

片上微腔激光器相比其他类型如气体、固体激光器和光纤激光器等,具有小型化、易集成、CMOS工艺兼容、高效率、低功耗、高光束质量等特点,一直是光电子领域的研究热点。基于半导体材料的微腔激光器和片上激光源已被广泛应用于通信、传感、生物医学、量子信息处理等领域^[1-2]。近年来,随着人工智能算力激增、数据中心带宽瓶颈与量子科技快速崛起,光芯片正从互联配件转变为算力网络与量子系统的关键载体,片上微腔激光器因此成为驱动光子芯片生态的“能量与信息源”^[3]。

半导体激光器凭借新颖的腔结构和材料组合来实现高效的光反馈与模式控制,形成阈值、功率、光束质量、模场体积、发射方式等不同特性,不断提升性能,拓宽应用场景。分布式反馈(DFB)激光器采用布拉格光栅结构,能够在单一纵模下输出,波长稳定性高,适用于长距离光纤通信^[4],还被用于片上可调光梳和面向AI数据中心的太比特级硅光收发器^[5];垂直腔面发射激光器(VCSEL)则利用短腔结构和垂直发射特点,能够实现低功耗、高集成度的激光输出,广泛应用于短距离通信、人脸识别和传感^[6],并已在光神经网络、现实增强(AR)/车载激光雷达(LiDAR)中实现J级能耗的高速计算与远距扫描^[7];回音壁模式(WGM)激光器的微腔结构利用全内反射效应获得极高的品质因子,同时具有更低的能耗和光场比表面积,使其适合高灵敏度传感应用^[8];而纳米激光器则通过创新的亚波长腔体结构突破衍射极限,在量子信息处理和生物成像中展现出巨大潜力^[9],如MIT的工作展示了金属包覆等离激元纳米激光器集成于量子光子芯片,实现皮瓦级激发与室温单光子放大^[10]。在近年来的发展中,波长级有源区掩埋激光器(LEAP)和光子晶体面发射激光器(PCSEL)等新兴技术也被逐步应用于片上激光器领域。LEAP激光器实现了低阈值、高效率

的激射,为低功耗片上集成提供了全新的技术途径^[11]。PCSEL利用二维光子晶体结构实现了低发散角和高功率输出,尤其适用于LiDAR和远距离高速光通信等应用^[12-13]。这些激光器因其独特的光学特性和腔体设计,体现了未来光子集成技术的重要发展方向。

本文对基于半导体材料的多种微腔和片上激光源进行了综述,通过对谐振腔原理、性能特性、应用范畴和发展进程的系统剖析,探讨各类激光器的发展过程、技术特性、不同场景中的适用情况与技术障碍,以及未来发展走向,为半导体激光器及光芯片领域提供技术方面的借鉴。

2 半导体片上微腔激光器分类

根据半导体片上激光器谐振腔类型的不同,主要可以分为:分布式反馈激光器(Distributed feedback laser, DFB lasers)、回音壁模式激光器(Whispering gallery mode lasers, WGM lasers)、垂直腔面发射激光器(Vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs)、光子晶体面发射激光器(Photonic crystal surface emitting lasers, PCSELs)、波长级有源区掩埋激光器(Lambda-scale embedded active region photonic crystal lasers, LEAP lasers)等。其中,基于不同的材料体系,又可分为InP、GaAs、GaN、ZnO激光器等;基于工作波长可分为可见光和红外激光器等;基于发射方式可分为边发射和面发射激光器;基于模式特性可分为单纵模和多模激光器等;基于结区不同可分为同质结、单异质结、双异质结激光器。表1对各个类型微腔激光器的原理、特点及应用进行了总结。图1为各类片上微腔激光器的典型谐振腔结构示意图。

DFB激光器在有源区形成周期性光栅结构,光栅通过布拉格散射选择性地反馈与其匹配的波长,并在有源区增益放大形成激射。这一机制使得DFB激光器能够在单一纵模下输出,极大地提高了波长的稳定性和选择性^[14]。DFB激光器的核心是基于布拉格光栅的谐振腔^[15],由于谐振腔

表 1 片上微腔激光器分类、原理、特点及应用

Tab. 1 Classification, principles, characteristics, and applications of on-chip micro-cavity lasers

激光器种类	原理机制	优点	缺点	参数典型值	应用及潜力
DFB lasers	面内分布式谐振反馈	单纵模、动态单模、 波长稳定、低功耗	集成性差、相对低功率、 制作成本高	阈值~10 mA	光通信、传感、原子光谱学
				功率 W 级 能耗~kJ/bit 带宽~10 GHz	
WGM lasers	曲面腔内全反射共振	低功耗、易于面内耦合、 微型化、高灵敏度、 窄线宽	低功率、工艺难度大、成 本高	阈值 μ A~mA	传感、监测、非线性光学、 量子信息处理
				功率 mW 级	
VCSELs	上下布拉格反射镜 F-P 共振加强	低阈值、小激光腔长、 易光纤耦合	多模、小功率、DBR 电阻 电容大	阈值 mA 级	光通信、3D 传感、人脸识别、 自动驾驶、医疗工业应用
				功率~10 mW 能耗~百 fJ/bit 带宽~10 GHz 阈值~百 mA	
PCSELs	二维分布式布拉格共振	单模、高输出功率、 低发散角、高光束 质量、易光纤耦合	大的谐振反馈面积带来 大电容、工艺难度大、成 本高	功率~10 W	光通信、激光武器、材料 加工
				能耗~百 fJ/bit 带宽~10 GHz 阈值~0.1 mA	
LEAP lasers	光子晶体布拉格反射	低阈值、低能耗、超紧凑、 易集成、高数据传输速率	低功率、易多模、低机械 强度、电泵困难	功率 μ W 级	光子片上集成、CMOS 片 上网络
				能耗~10 fJ/bit 带宽~百 GHz	

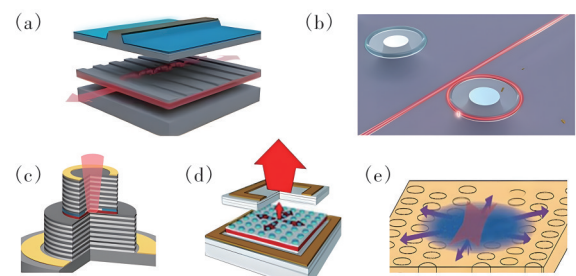


图 1 片上微腔激光器谐振腔结构示意图。(a)DFB 微腔;(b)WGM 微腔;(c)VCSELs 微腔;(d)PCSELs 微腔;(e)LEAP 微腔

Fig.1 On-chip micro-cavity lasers. (a)DFB. (b)WGM. (c)VCSELs. (d)PCSELs. (e)LEAP

与有源区平行,光在波导中传播,并从激光器的端面发射出来。这种结构的制造工艺较为成熟,特别是在长距离光纤通信中,DFB 激光器的边发射结构能够提供高方向性和窄光束发散角,适合与光纤耦合连接^[16]。

WGM 激光器谐振腔是利用腔体的曲面内壁实现光束的全内反射^[17]。当光在球形、圆盘或环形腔体的内壁传播时,只要路径长度和波长之间满足整数倍关系,就会形成共振^[18]。这种全内反射保证了光束能够在微腔表面长时间循环,并在每次反射过程中与腔内材料发生相互作用。由于微腔的曲率使光束紧密围绕内壁传播,大幅降低了光的散射损耗和泄漏^[19],且其大大缩小了模式体积,使得能量密度显著提高。此外,WGM 微腔具备极

高的品质因子,即光子在腔体内的寿命较长,这意味着每个光子可以在腔内经历大量循环而不被吸收或散射,从而极大地降低了激光的阈值功率^[20]。

VCSEL 是一种短腔、垂直于衬底表面发射的激光器结构。其原理和 EELs 类似,都是通过反射镜形成光子谐振和选模。EELs 是通过晶片自然解理反射面及加涂的反射层实现高反,VCSEL 则通过上下的布拉格反射镜 (DBR) 来形成谐振腔^[21],最终通过谐振腔向垂直方向发射光束。此外,VCSEL 一般通过氧化限制层或离子注入的方法进行电流约束或光场模式的限制以提升器件各项性能。

PCSEL 的主要特点是利用大面积二维光子晶体的布拉格共振实现面发射激光。在光子晶体层中,由于两种折射率差异较大的材料形成的晶格结构,一阶布洛赫波和高阶布洛赫波之间会发生耦合。这种相互作用使得 PCSEL 能够进行大面积的二维相干激光振荡,在其能带 Γ 点的光还会衍射到垂直方向,形成垂直面输出激光^[22]。

LEAP 激光器是光子晶体缺陷型谐振腔,带隙内频率通过四周光子晶体的面内反馈形成小面积的共振,而有源发光区设置在缺陷腔内部,从而利用受激辐射不断实现增益和模式胜出。LEAP 的特点是小模场体积、低阈值、低能耗和高的品质因子模场体积比 (Q/V_m)。

3 分布式反馈(DFB)激光器

3.1 DFB激光器发展历程

在DFB激光器广泛使用前期,法布里-玻罗(F-P)腔激光器是光通信中最为广泛使用的器件^[23-24]。然而,F-P腔缺乏有效的选模机制,通常在多纵模状态下工作,模式选择性差,难以适应更高性能的需求。为了解决F-P型激光器的多

纵模输出和波长不稳定问题,DFB激光器的概念最早由Kogelnik等提出^[25-26],并于1973年在贝尔实验室实现了DFB激光器的首次展示^[27]。表2总结了该类激光器的发展历程及对应的重要技术突破。DFB已经发展出多种器件结构,比如多段DFB激光器^[41]、多相移DFB激光器^[42]、多量子阱(MQW)DFB激光器^[43]、增益耦合DFB激光器^[44]等。

表 2 DFB激光器发展历程
Tab. 2 The development history of DFB lasers

年份	发展里程碑	激光器技术特点
1970年代	Kogelnik和Shank提出了DFB激光器的分布反馈机制概念 ^[25] ,贝尔实验室成功展示了第一台半导体DFB激光器 ^[27]	实现了单纵模输出,波长稳定性好,初始输出功率为1~2 mW,阈值电流约为10~20 mA,主要应用于850 nm波段,调制带宽小于1 Gbps
1980年代	DFB激光器广泛应用于长距离光纤通信;体现出波长稳定性和窄线宽优势	输出功率提高到几毫瓦,阈值电流降低至5~10 mA,工作波长扩展至1 310 nm和1 550 nm,调制带宽提升到2~4 Gbps,具备高波长稳定性,适用于单模光纤通信 ^[28]
1990年代	多波长DFB激光阵列的发展推动了其在DWDM系统中的应用	实现多波长激光器阵列,输出功率进一步提升至10~20 mW,阈值电流为3~5 mA,调制带宽提升至10 Gbps,波长范围进一步扩展并精准控制,支持DWDM系统 ^[29]
2000年代	集成光子技术的发展使得DFB激光器在电信和传感等领域得到广泛应用	输出功率可达20~30 mW,调制带宽提升至25 Gbps,工作波长覆盖850~1 550 nm,阈值电流降至3 mA以下,适用于光纤传感和高速光通信 ^[30-33]
2020年	研究集中在更高功率、更宽波长范围和更低功耗的DFB,推动其在下一代光通信中的应用	输出功率达到30~50 mW,调制带宽超过40 Gbps,波长可调谐,工作波长扩展至1 650 nm及以上,阈值电流进一步降低至1~2 mA,适用于超高速长距离光纤通信和传感应用 ^[34-35]
2021—2023年	直接调制DFB首次在百吉比特级以太网中大规模验证;车站-屋顶5G前传已采用25G级DFB芯片;面向CPO的高功率SOA-集成DFB开启“片上光源”时代	连续输出光功率~350 mW,光电转换效率>25%,专为CPO/AI服务器设计;调制带宽27 GHz,对应106 Gb/s PAM-4直接调制;工作温区-40~85 ℃无TEC,25 Gb/s适配5G前传严苛环境 ^[36-38]
2024—2025年	向高功率/长波长,双赛道迈进。400 mW级1.3 μm DFB上线,减少AI训练集群所需光源数;0.5 W DFB成为车载LiDAR与气体遥测候选光源	峰值输出0.5 W(1 550 nm),单频线宽<200 kHz,可使车载LiDAR探测距离>300 m,同时适合甲烷/CO ₂ 遥测;阈值电流~13 mA(C波段量子点DFB),阈值低,省电且发热小 ^[39-40]

随着波分复用和密集波分复用(WDM/DWDM)技术的兴起,单纵模工作的DFB激光器成为光通信系统的主流光源。用于数据传输光源,器件的直接调制带宽是研究的重点。目前,商用的直接调制DFB激光器都已采用了应变多量子阱结构,在此基础上减小有源区体积和通过光-光振荡(PPR)及失谐加载效应(DL),是21世纪以来报道提升调制性能的主要方法。2007年,日本日立公司采用端面高反射膜实现了29 GHz的调制带宽^[30]。2016—2023年,Matsui^[31]、Liu^[32,45]、Zhu^[46]等分别报道了集成不同反射镜以减小腔长的DFB结构,将有源注入区的长度减小到了150 μm以下。2019年,Oclaro公司采用亚微米掩埋异质结波导结构获取高光场限制因子,实现了112 Gb·s⁻¹的调制速率^[47]。2020年,Finisar公司提出一种利

用PPR和DL效应将调制带宽提高到50 GHz以上,实现了200 Gb·s⁻¹的传输速率^[34]。2021年,日本NTT公司在高热导率碳化硅衬底制作薄的有源区实现高光场限制因子的小腔长薄膜型InP-DFB,实现了108 GHz的调制带宽^[48],器件结构示意图和实物照片如图2(a)~(b)所示。而减小有源区体积带来高调制性能的同时会引起阈值和功率性能下降,所以很多有意义的工作是在维持其他性能的同时实现高调制特性。2023年,中国科学院半导体研究所采用氧化物侧向限制结构,约束光场和电流,实现了高性能激光输出^[49]。2025年,Ma等设计了三区的DFB结构,如图2(c)所示,通过同时使用PPR和DL效应,实现55 GHz带宽的同时保持了10 mW的室温连续波输出^[50]。

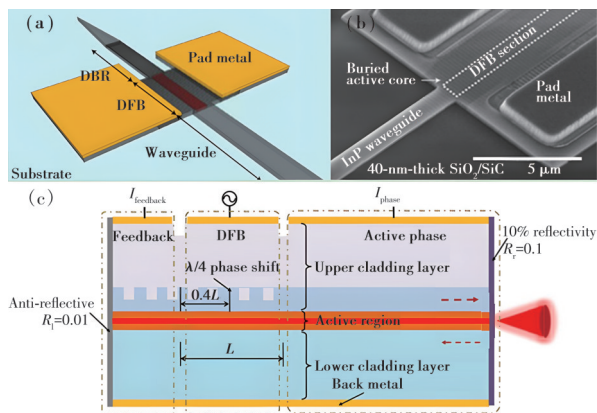


图2 (a) 器件结构示意图; (b) 器件实物 SEM 照片^[48]; (c) 三区 DFB 结构示意图^[50]

Fig.2 (a) The schematic diagram of the device. (b) The SEM picture of the fabricated device^[48]. (c) The configuration of the 3 region DFB^[50]

3.2 DFB 激光器特点及应用

DFB 激光器的输出功率通常在几毫瓦到几十瓦之间^[51],具体取决于激光器的耦合系数、腔长、有源区设计及注入电流的大小^[52-54]。DFB 激光器的阈值电流较低,通常在几毫安至几十毫安之间^[49],这得益于其高效的反馈机制。谐振腔高的光子密度和载流子浓度形成有源区较高的光增益,使 DFB 激光器能够在较低电流下实现激射,降低功耗,提高电光转换效率^[55]。相比其他类型激光器,DFB 激光器在功耗控制和能效方面表现优异,尤其适用于长时间稳定工作的场景。在已开发的波段中,DFB 激光器覆盖了关键通信波段,尤其是 1.3 μm 和 1.55 μm 波段^[28]。目前,DFB 激光器已经广泛应用于光通信,商用型号如 NICHIA 的 NF4N21 系列,支持 1.3 μm 和 1.55 μm 波段的高功率输出,并具有超过 25 Gbps 的调制带宽,应用于长距离光纤通信系统中。

DFB 激光器在未来光通信和传感领域中具有广阔的应用前景,尤其是在 WDM/DWDM 系统和微波光子学等高要求场景中^[56]。随着光通信技术的

不断进步,对高稳定性、单模输出和精确波长控制的需求日益增长。在高精度惯性导航系统中,DFB 激光器被广泛应用于光纤陀螺仪。其单模输出和高稳定性使其能够提供极低噪声、长时间稳定的光源,从而提升了光纤陀螺仪的精度和可靠性。

尽管 DFB 激光器在众多应用中表现出色,但仍面临一些技术瓶颈,如工艺制备、热稳定性等方面。DFB 激光器的核心是内置布拉格光栅,工艺中易出现光栅形变、边缘粗糙等问题,影响单模特性,有源区需与光栅层精确对准,否则导致模式竞争和边模抑制比下降,这些都对外延生长和工艺稳定性要求极高。此外,当前的 DFB 光发射芯片在不控温情况下波长漂移在 15 nm 左右,这包括片内波长偏差和 10 nm 左右的温度波长漂移,在更多应用场景下必须采用 TEC(温控系统)来控制芯片温度抑制波长的漂移,但 TEC 及其封装会带来更高成本。未来的发展关键在于提升波长聚焦能力^[57],提高工艺稳定性、热稳定性、集成度、多波长激光器和高功率输出的技术改进上。未来有望通过新材料应用、纳米结构优化及制造工艺改良,进一步降低成本、提升性能,使 DFB 激光器得到更广泛的应用^[58]。

4 回音壁模式(WGM)激光器

4.1 WGM 激光器发展历程

WGM 的概念源自 1910 年 Lord Rayleigh 的声学研究,他发现声音可沿圆形表面多次反射并保持强度,这一现象被称为回音壁效应。20 世纪后期,光学领域的研究者将这一现象应用于电磁波的传播^[59],通过在圆形或环形微腔中实现光的全内反射束缚,使得光在微腔表面多次反射而不泄露。这种束缚模式形成了 WGM 光学谐振器,其结构不仅提升了光与物质的相互作用,还使能量密度极高,从而大大降低了激光的阈值功率^[60]。

WGM 激光器重点的发展历程见表 3。

表 3 WGM 激光器发展历程

Tab. 3 The development history of WGM lasers

年份	发展里程碑	激光器特点
1970 年代	光学实验中首次观察到 WGM 现象 ^[18]	基于回音壁效应的小型谐振器,探索高 Q 值理论,但尚未实现激光激射
2000 年代	WGM 谐振器在非线性光学领域取得突破 ^[17]	实现了频率倍频、四波混频和拉曼散射,推动 WGM 激光器在非线性光学中的应用
2010 年后	微纳制造技术推动 WGM 激光器的应用 ^[61]	广泛应用于生物传感、片上光学和量子信息,极大降低了激光阈值
2020 年后	持续优化 WGM 微腔在片上集成中的应用	发展更高 Q 值的谐振器,提高环境稳定性和耦合效率,用于物联网传感与量子应用 ^[62]

从已有报道看,圆盘、圆柱、圆环、圆球等圆形 WGM 结构具有更高的谐振品质而更受研究者青

睐^[63-66],但其有一个重要问题就是由于各向同性而导致的高效光发射困难。因而三角形、螺旋形、谐

波级数形、方形、六边形等各种结构方案被提出^[67-74],详细内容可参见中国科学院半导体研究所黄永箴等的综述论文^[75-76]。2022—2023年,黄永箴课题组通过圆边六角^[77]或圆边四角^[78]WGM谐

振腔实现混乱态的基模和一阶模的双模式激光,揭示了模式间相互作用机制,实现了一种新型随机数激光器。图3所示为所报道圆边六角WGM及其谐振特性和模式分布。

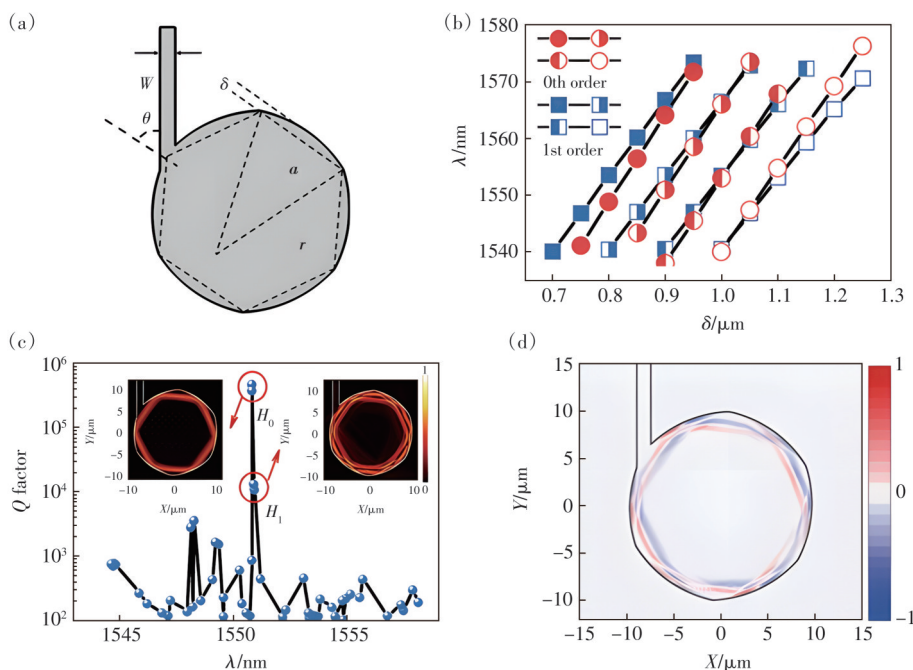


图3 (a)所设计WGM结构示意图;(b)不同模式波长;(c)不同波长品质因数;(d)腔内场分布^[77]

Fig.3 (a) The designed WGM structure. (b) The supported mode at different wavelengths. (c) The quality factor of different modes. (d) The mode distribution in the cavity^[77]

WGM目前已发展出基于各类半导体材料的不同波段激光器,有InP基^[79-80]近红外波段、ZnO基^[81-82]紫外波段以及GaN基^[83-84]可见和紫外波段等。

具有六边形横截面的单个ZnO微纳结构是一个天然的WGM微腔,ZnO基WGM的发展是WGM激光器的缩影。由于缺乏稳定的p型ZnO,ZnO电泵激光器件通常基于p型异质材料的异质结构。2018—2022年,n-ZnO/p-GaN异质结构作为超低阈值激光器件得到了广泛研究,包括n-ZnO微米棒/p-GaN异质结^[81]、n-Ag@ZnO MW/MgO/p-GaN范德瓦尔斯异质结^[85]、n-MgO@ZnO:Ga MW/p-GaN异质结^[86]等,通过降低异质结界面的光学损耗使激光性能不断提升,如图4(a)、(b)、(e)、(f)所示。此外,基于金属-半导体肖特基结,Bashar^[87]报道了Au/ZnO微米线WGM肖特基激光二极管激子激光,器件结构、伏安曲线和EL光谱见图4(c)~(d)。2024年,Xu等^[88]通过n-AlGaIn/SnO₂/n-PtNPs@ZnO:Ga MW/Pt/MgO/p-GaN双异质结提高载流子注入效率和降低光学损耗,实现EL稳定的高亮度窄带纯紫外激光发射。

GaN基WGM激光器的研究主要呈现出新工艺、新结构及带来新性能的特征。南京邮电大学朱刚毅等围绕新颖GaN微盘腔制备、微盘激光的光学特性调控和电泵浦激射等进行了富有成效的研究。设计并制备了侧壁带光栅直径为10 μm的能够进行激光模式选择的GaN悬浮微盘,获得了单模GaN回音壁紫外激光^[89],制备微烟囱状的GaN微腔获得了单模紫外激光^[90],如图5(a)~(b)所示。研究了WGM微腔的激光特性与微腔厚度、侧壁光滑度、微腔直径和表面光滑度的关系^[91]。研究了焦耳热和传导热对微腔激光模式的调控^[92-93]。设计并制备了非对称耦合微腔,通过游标效用和热调控来对WGM激光的激光模式进行动态调控,通过热调控和结构调控最终获得了单方向发射的单模紫外激光^[94],如图5(c)~(d)所示。2024年,中国香港大学^[95]报道通过激光剥离GaN基薄膜和金属化切减的工艺实现新颖的蓝光波段微盘结构,使微腔具有高的光场限制因子和高达10⁵的品质因数,实现了约1 000 W·cm⁻²低阈值和40%内量子效率的高性能激光,如图5(e)~(f)所示。

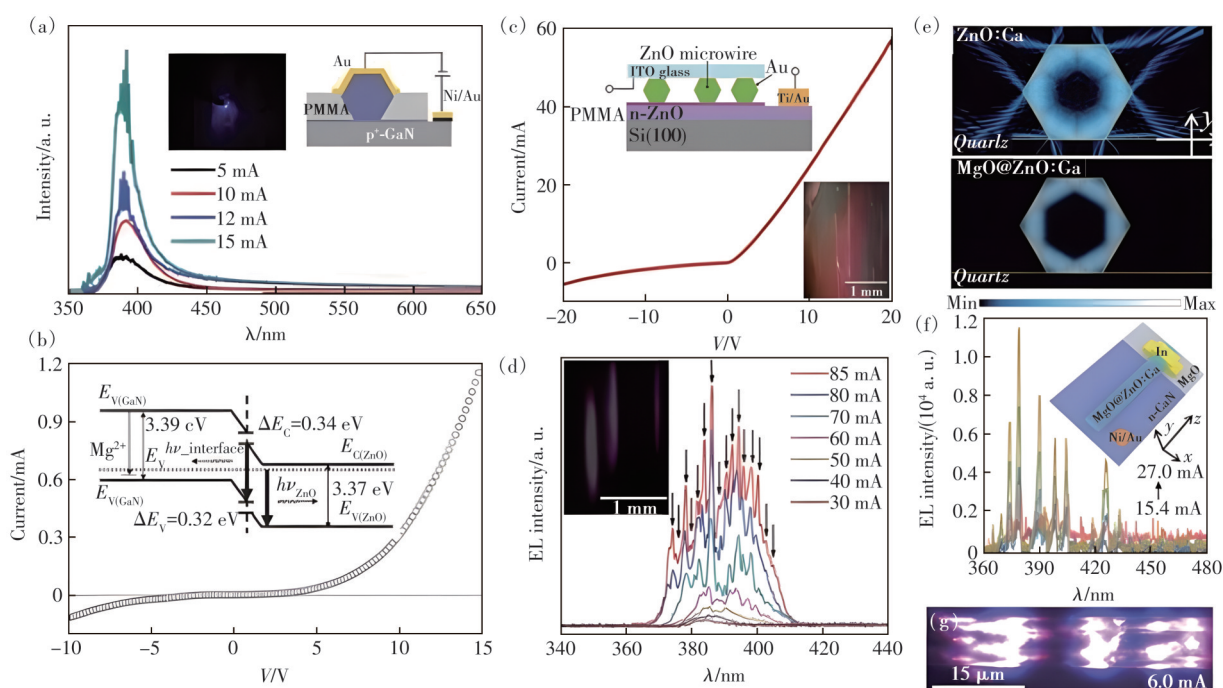


图4 (a)不同电流下EL光谱以及发光图像和器件结构图;(b)器件伏安特性曲线及能带结构示意图^[81];(c)器件的伏安特性曲线及相关结构示意图和光学照片;(d)不同注入电流下的EL光谱以及85 mA下的远场发射^[87];(e)带有和不带有MgO纳米层的ZnO微米线的电场强度分布;(f)器件结构示意图及其在不同电流下的EL光谱;(g)器件微区发光图^[86]

Fig.4 (a) The EL spectra under different applied current, photograph of the EL emission from sample and the schematic diagram. (b) I - V curve for the heterojunction diodes and a schematic of the band diagram^[81]. (c) I - V characteristic and schematic diagram of the cross-sectional view of Au/ZnO microwire Schottky diode laser. (d) Emission spectra of the diode under different injection currents. Arrows represent WGM lasing modes, inset shows far-field emission pattern of the device at a current of 85 mA^[87]. (e) Numerically simulated electric field intensity distribution within the hexagon-shaped cross section. (f) Schematic diagram and EL spectra of the device under CW operation. (g) Optical microscope EL image of the device^[86]

近些年,研究者还重点对WGM激光器的工作原理、效率及应用展开研究。2019年,Lafalce等研究了WGM激光器的激发条件和原理,提出和解释了回音壁模式频率劈裂的内部机制,通过调控泵浦改变微分增益,可以改变模式数量^[96]。2025年,有报道分析了WGM激光器在生物传感器中的潜力,尤其是在生物分子检测和光学成像中的应用,凭借其高灵敏度和微型化特性,成为理想的光学传感器,用于医学诊断和疾病预警^[97]。另一项报道着眼于小型化单模WGM激光器的研究,强调了其低阈值和单模特性的优势,尤其在小型化光通信中的应用前景,使其在未来光通信系统中成为不可或缺的组成部分^[98]。2023年,WGM激光器还在微型化LiDAR系统中获得应用,解决了小尺寸与高功率输出之间的平衡问题,为自动驾驶和地理信息系统提供了精确的技术支持^[99]。2022年,Wong等综述

了量子点掩埋型WGM激光器的特点,并探讨了其在量子信息处理和量子计算中的潜在应用,推动了量子技术的发展^[100]。

鉴于篇幅有限,不再详述更多相关进展,读者可参阅[59,75,101]等相关综述文章。

4.2 WGM激光器特点及应用

WGM激光器由于其高品质因子和小模式体积,使得光能量被限制在微腔内以维持共振,而非大规模输出。这类激光器采用边缘耦合方式输出光^[102],相比面发射激光器效率较低,因此其总功率受到限制。这使得WGM激光器的输出功率通常较低,一般在微瓦到毫瓦量级^[61]。

WGM激光器凭借其高 Q 值、低功耗、易于面内耦合和微型化特性,在多种应用中展现出巨大的潜力^[103]。其极高的灵敏度和狭窄线宽使其成为生物传感和环境监测的理想选择,能够检测微量生物分

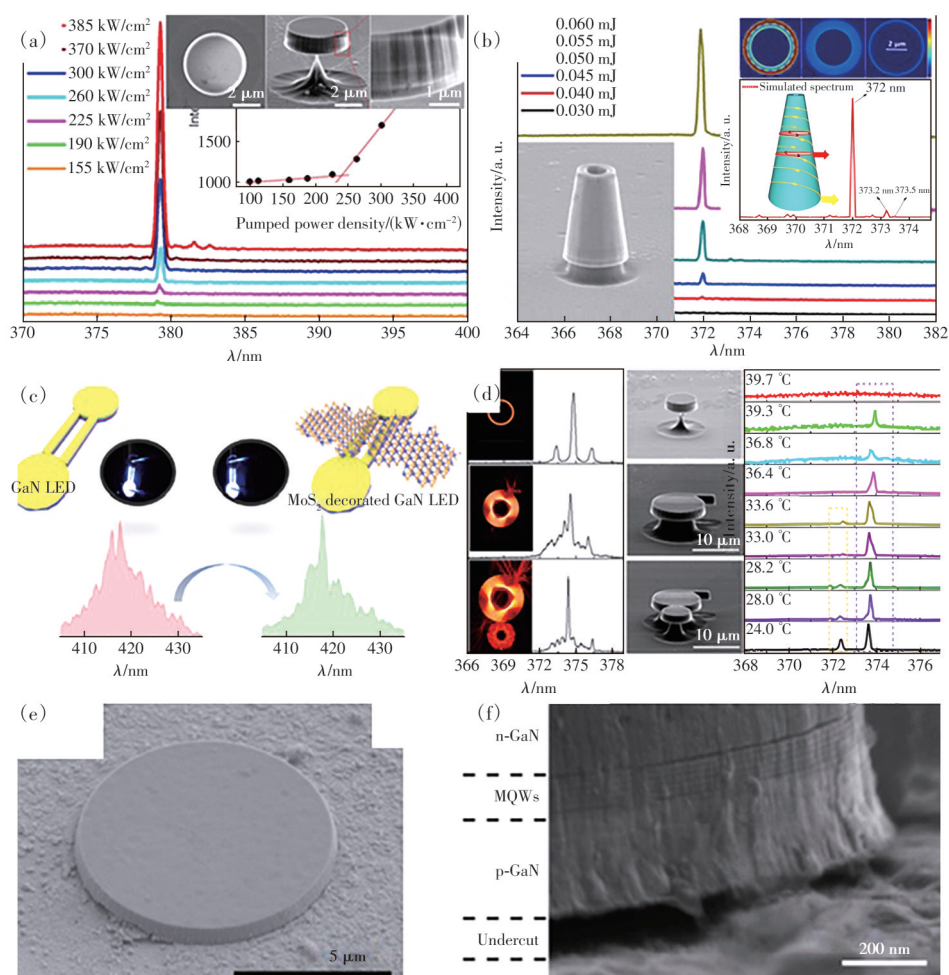


图5 (a)侧壁带光栅悬浮微盘获得的单模WGM紫外激光;(b)微烟囱获得的单模WGM紫外激光^[90];(c)~(d)通过热调控和游标效应调控的Ga_N微腔激光器^[94];(e)整体SEM照片;(f)截面SEM照片^[95]

Fig.5 (a) The fabricated floated Ga_N-WGM and lasing characteristics. (b) Micro-chimney WGM microcavity structure and the lasing in UV band^[90]. (c)~(d) Ga_N microcavity laser controlled by thermal regulation and Vernier-effect^[94]. (e) The SEM image of the fabricated device. (f) SEM image of the whispering gallery side^[95]

子和污染物。WGM激光器的能耗极低,非常适合长期稳定运行的传感系统,尤其是在需要低功耗和高稳定性的应用场景中。WGM激光器的小型化和高灵敏度特性,非常契合片上光学集成、物联网传感和智能设备的需求^[104-105]。由于WGM激光器能够实现单一频率激光输出,所以其可在非线性光学和量子信息处理等领域具有广泛的应用^[106]。在非线性光学和量子计算领域,WGM微腔为实现频率倍增、量子纠缠等复杂光学过程提供了理想平台^[61]。随着微纳制造技术的不断进步,WGM激光器的制造精度和耦合效率将进一步提升,为其在物联网传感网络、量子通信和导航系统^[107]中的应用带来更多可能。同时,新材料的开发和波段扩展将增强其性能,使其覆盖更广泛的应用场景。

尽管WGM激光器具备诸多优势,其研究与应

用仍然面临多重挑战。首先,WGM激光器的制造成本高昂且工艺复杂,实现高品质因子微腔对加工条件具有较高要求,如加工精度、微盘清洁度、表面粗糙度等,这些都极大地影响WGM的谐振损耗。其次,WGM腔结构会因热应力、机械应力(如封装压力)发生微小变形时,回音壁模式的光程差会改变,导致模式失配;WGM腔的表面积/体积比更大,因此表面粗糙度和污染都可能带来激光性能下降和失效问题;WGM激光器对环境条件高度敏感^[108],温度或湿度的微小波动都会影响光学性能,并导致输出信号不稳定。此外,回音壁结构的热阻高、热形变严重,在热管理方面具有较大挑战。WGM激光器目前主要用于低功耗和高灵敏度的传感场景^[109]。未来的研究需集中于简化制造工艺、提升集成度和稳定性,并开发新型材料和结构以克服这些瓶颈^[110]。

5 垂直腔面发射激光器 (VCSEL)

5.1 VCSEL 发展历程

为了解决传统边发射激光器在某些应用中的局限性,尤其是在可集成性、激光性能、输出模式^[111]等方面的问题,VCSEL 的概念由 Kenichi Iga^[112]于 1977 年在日本东京工业大学提出,并在 1979 年采用 GaInAsP 材料体系在 77 K^[113]温度下首次实现脉冲输出。VCSEL 的小有源区体积使其本身具有低阈值、高斜率效率和高调制带宽的特征^[114],如果能在在此基础上实现更高功率或更高效率无疑成为科学家们追求的目标。

通过增大有源区体积和氧化孔径是提升功率和效率的主要方法。近年来报道的多结有源区设计,增大有源区体积的同时通过量子隧穿效应实现优异的电学性能,同时可保持氧化孔径不变。2022 年, Liu 等^[115]报道了 8 结的多结有源区 VCSEL,实现了超

过 60% 的电源转换效率和 $8 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$ 的斜率效率。但功率的提升会伴随出现光束质量变差及多模问题。2023 年, Ghods 等^[116]采用表面浮雕的方法设计了一种 $8 \mu\text{m}$ 氧化孔径 VCSEL,通过反相位横模过滤结构和多结的有源区结构,实现了室温下最大输出功率 12.55 mW、边模抑制比大于 30 dB、功率转换效率 56% 的 905 nm 单模输出。另一方面,VCSEL 的优势是模式特性、光束质量和调制带宽,而它们和输出功率是一对需要权衡设计的性能,大孔径和大有源区带来高功率的同时会牺牲调制带宽等特性。近年来,有研究者通过多个单模孔径的设计实现了在保持模式特性的情况下提升出射功率^[117],如图 6(a) 所示。另外,通过在顶部 DBR 表面制作金属光栅,在保持大功率同时提升光束质量,在室温连续波 860 mW 功率输出下,远场发散角保持在 12° ^[118],如图 6(b)~(c) 所示。Hassan 等通过在大氧化孔径 VCSEL 的表面集成光栅,在 3 W 的脉冲功率输出下,光束发

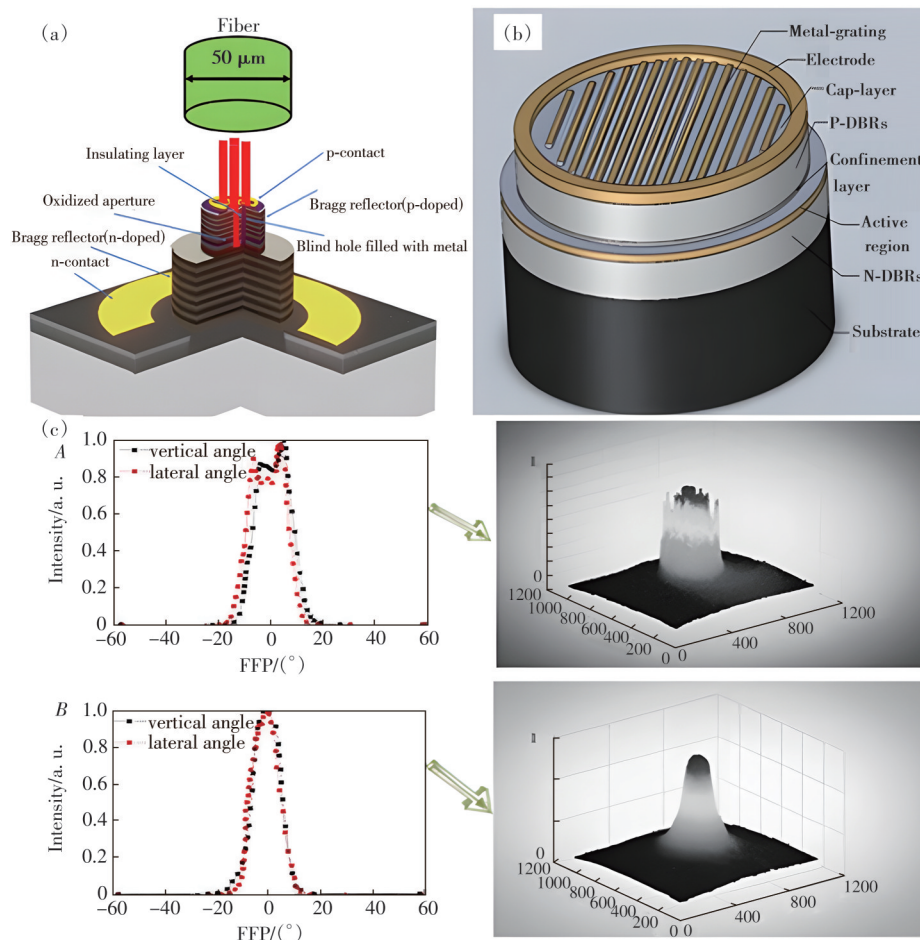


图 6 (a) 四孔径 VCSEL 示意图^[117]; (b) 金属光栅辅助的 VCSEL 结构示意图及其 (c) 远场发散角 B 和传统 VCSEL 的远场发散角 A ^[118]

Fig.6 (a) The proposed four aperture VCSEL^[117]. (b) Schematic diagram of VCSEL structure assisted by metal grating and (c) its far-field divergence angle, as well as the far-field divergence angle of traditional VCSEL^[118]

散角只有0.053^[119]。2024年,Xiao等报道了制备15结级联的VCSEL实现了室温下高达74%的功率转换效率,已和传统边发射激光器(EELs)报道的效率

相当^[120]。如图7所示,(a)为结构图,(b)为光场分布图,(c)为器件SEM照片,(d)为功率效率测试曲线。

VCSEL的发展历程概览见表4。

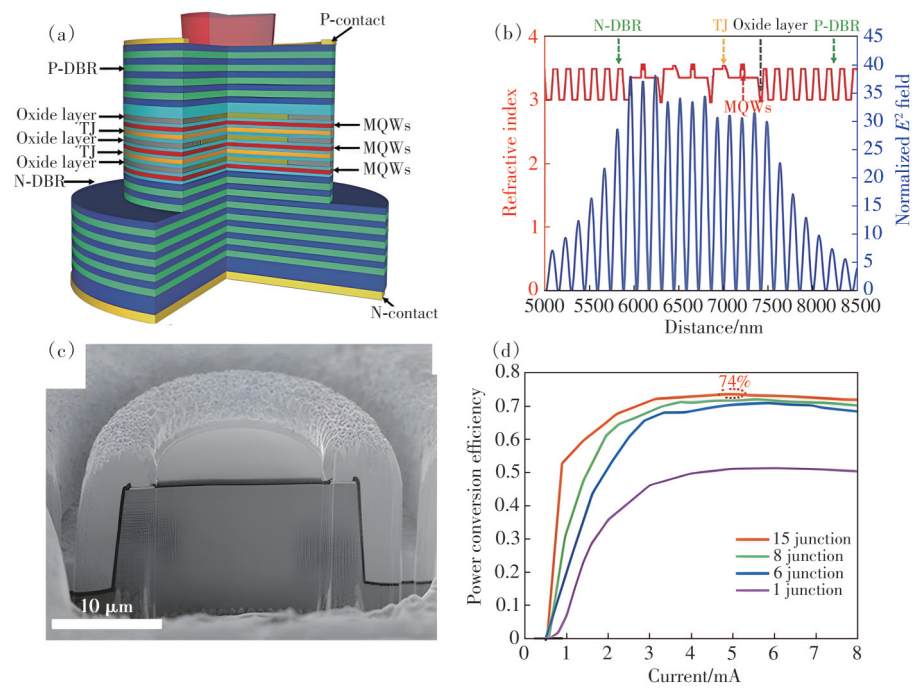


图7 (a)多结VCSEL结构示意图;(b)折射率分布和驻波场分布图;(c)器件的整体截面SEM照片;(d)不同结数量的功率效率测试曲线^[120]

Fig.7 (a)Structural schematic diagram. (b)Refractive index distribution, standing wave light field distribution. (c)Cross-sectional SEM image of the 15-junction VCSEL. (d)The power conversion efficiency of VCSELs with different numbers of junctions, the maximum efficiency of the 15-junction VCSEL reached 74%^[120]

表4 VCSEL激光器发展历程

Tab. 4 The development history of VCSEL

年份	发展里程碑	激光器性能
1977年	Kenichi Iga 在日本工业大学提出基于垂直腔设计实现激光发射	基本理论提出,尚无实际应用,目标是通过垂直发射激光简化光源的集成和耦合
1980年代	VCSEL进入早期实验阶段,研究机构探索其面发射特性及工艺实现电注入激励 ^[121]	输出功率低(<1 mW),阈值电流高(>10 mA),能耗较高,调制带宽较小(<1 Gbps),主要工作在850 nm波段 ^[6]
1990年代	推出首批商用VCSEL,用于千兆以太网和短距离高速通信 ^[122]	输出功率为1~2 mW,阈值电流为2~3 mA,调制带宽提升至1~2.5 Gbps,发射波长通常为850 nm,能耗显著降低,适合短距离高速通信 ^[123]
2000年代	采用了量子阱结构和氧化限制结构	输出功率提升至10 mW,阈值电流降至1~2 mA,工作波长扩展至850 nm及以下,支持多模和单模输出 ^[125]
2010年代	VCSEL技术逐渐成熟,应用扩展至光通信、3D传感和消费电子第一个电注入GaIn-VCSEL ^[124]	输出功率达到10~20 mW,阈值电流为1 mA以下,调制带宽提升至25 Gbps,发射波长扩展至940 nm和1 310 nm,功率密度提升显著,能耗进一步优化至低于1 mW/Gbps ^[127-128]
2020—2023年	VCSEL阵列技术被广泛应用,特别是在3D传感和激光雷达中 ^[126]	850 nm VCSEL 3 dB 调制带宽 27 GHz,单通道 106 Gb/s PAM-4 误码率<10 ⁻¹²
2020—2023年	VCSEL开始服务于超大规模数据中心与车规级LiDAR	905 nm 多结阵列峰值功率 400 W,斜率效率 4.2 W/A ^[129-130]
2020—2023年	在光互连领域,百吉比特级VCSEL被用于共封装光学(CPO)原型;在感知领域,多结VCSEL阵列获得汽车可靠性认证,为远距LiDAR奠定基础	重点集中于波长调谐技术,阈值电流以及能耗进一步优化降低 ^[131]
2024—2025年	VCSEL进一步向高速与长波长演进:抗反射腔等新型结构显著提升亮度并收窄发散角,用于车载LiDAR;首批电注入量子点C波段VCSEL报道,为低损耗光纤链路打开路径	抗反射腔VCSEL:单管28 mW连续输出,发散角8°~16°,亮度提升约3倍 ^[132] ;1 550 nm量子点VCSEL:电流阈值13 mA即产生激射,实现首例电注入C波段VCSEL ^[133]

5.2 VCSEL 特点及应用前景

虽然 VCSEL 也是用于单模输出的半导体激光器^[134],但其形成原因与 DFB 激光器有很大不同。VCSEL 的单模输出主要依靠两种方式:缩小腔体尺寸和氧化限制层^[135-136]。这两种方式有效限制了激光器的模态数量,使得激光只能在单一纵模下工作。其光束垂直于晶圆表面发射,且具有圆形对称、小发散角等优异面发射特性^[137]。

在输出功率方面,VCSEL 的输出功率通常在几毫瓦到 50 毫瓦之间,其功率因素主要受到 DBR 的反射率以及腔体结构设计等影响^[138]。较高的 DBR 反射率不仅能降低阈值电流,还能提高输出效率^[111,122]。这进一步促进了 VCSEL 的阈值电流较 DFB 激光器低,这主要得益于其小型化的垂直腔结构,并且氧化限制孔径进一步降低了阈值电流。VCSEL 激光器凭借面发射结构和高反射 DBR 的加持,其电光转换效率较高,尤其在短距离高密度集成设计中表现出较低的能耗。

自 2020 年以来,VCSEL 的应用在多个领域取得了显著进展,尤其是在光通信、3D 传感、人脸识别、自动驾驶、医疗及工业应用方面。在高速光通信领域,VCSEL 正向 100 Gbps 及更高的短距离传输速度迈进,以满足数据中心和光纤通信网络对带宽不断增长的需求^[139]。在消费电子领域,VCSEL 广泛应用于 iPhone 的 Face ID、LiDAR 及 AR/VR 设备,为 3D 传感和空间定位提供了更高的精度与稳定性^[140]。在自动驾驶领域,VCSEL 成为激光雷达系统的重要组成部分,凭借其高分辨率和成本效益,为自动驾驶车辆的环境感知提供了关键支持。在医疗领域,VCSEL 用于生物传感、血氧监测和皮肤成像等技术中^[141]。由于其微型化和高稳定性,可穿戴设备也广泛受益于该技术。在工业领域,VCSEL 已用于材料加工和精密测量,进一步推动了自动化制造的发展^[142]。目前,VCSELs 的制备工艺也已相对成熟,但多层 DBR 工艺复杂度和精度控制、选择性氧化等仍然是制备难点;高功率工作时,DBR 的热效应以及热波长漂移问题依然凸显,业界已在多结 VCSELs 取得突破,但高功率器件的可靠性仍是产业化瓶颈。未来,VCSEL 将朝着更高功率、更高效率、多波长集成及微型化的方向发展,以拓展其在光通信、消费电子及自动驾驶领域中的应用

范围。

6 光子晶体激光器

1897 年,Yablonovitch^[143]首次提出“光子带隙”概念,指出通过周期性结构的设计,可形成光子禁带,阻挡特定频率的光子。同年,John^[144]提出了光子在无序介质中发生“局域化”的现象,即光子被限制在材料的某些区域。这一发现为光子传播控制开辟了新方法,两人独立提出的光子晶体概念对光学、材料科学和固体物理学的发展产生了深远影响,推动了后续广泛研究和光子晶体激光器的出现。

6.1 波长级有源区掩埋激光器(LEAP)

6.1.1 LEAP 激光器起源及发展

LEAP 激光器的概念最早由 Matsuo 等^[145-146]于 2012 年提出并实现。Matsuo 以及日本电报电话公司(NTT)研究团队在研究室温连续波半导体激光器时,成功开发了在室温下连续工作的波长尺度嵌入式有源区光子晶体激光器,其结构如图 8(a)~(b)。通过光泵浦,其实验团队展示了 6.8 μW 的低阈值输入功率,-10.3 dBm 的输出功率,以及 20 $\text{Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的直接调制,并且实现了 8.76 $\text{fJ}\cdot\text{bit}^{-1}$ 的能耗。此外,通过控制光子晶体的晶格常数,实现了超过 100 nm 的波长调节。在结构上,该激光器将基于 InGaAsP 的波长尺度有源区嵌入到 InP 基光子晶体的线性缺陷波导中,在有源区内实现了对光子和载流子的强约束。由于 InP 层的热导率和带隙均大于 InGaAsP 层,因此这种设计大大降低了热阻,展现出作为超小型、低功耗和可调谐波长光源应用于片上光子网络和集成光子电路的潜力,并为在 CMOS 芯片上构建大规模光子集成电路提供了可能。

2013 年,NTT 的 Takeda^[147]团队发表的文章中,LEAP 激光器再次得到发展。其采用了埋藏异质结构、光子晶体纳米腔、离子注入和热扩散实现的横向 p-n 结、InAlAs 牺牲层和阻流沟槽等技术,所研发出的 LEAP 激光器不仅具有极低的阈值电流,且在 10 $\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 直接调制下,能耗仅为 4.4 $\text{fJ}\cdot\text{bit}^{-1}$ 。而 Sato^[148]则采用了 InGaAlAs 多量子阱作为有源区,使激光器能够在高温下抑制载流子从量子阱中溢出,实现了高达 95 $^{\circ}\text{C}$ 的高温连续波工作。同年,Shinya^[149]团队利用埋藏异质结构技术,创新性地使用耦合缓冲区域,降低高阶模式的品质因子,同时保持基本腔模和输出波导之间的高耦合效率,

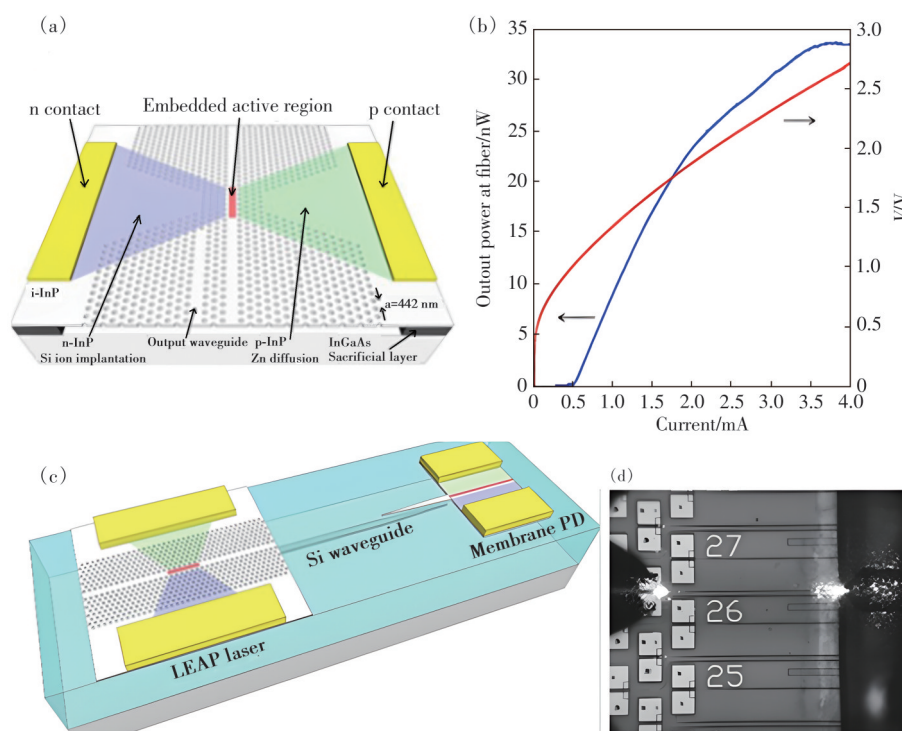


图8 (a)电驱动LEAP激光器示意图;(b)LEAP激光器LI特性^[146]; (c)LEAP激光器和硅波导及探测器集成示意图;(d)测试时的红外照片^[153]

Fig.8 (a) Schematic diagram of electrically driven LEAP lasers. (b) LI characteristics of electrically driven LEAP laser^[146]. (c) Bird eye schematic of LEAP lasers on Si waveguides, membrane PDs are connected by waveguides. (d) IR image during measurements^[153]

提高了腔-波导耦合的可控性,并在大有源体积的纳米腔激光器中实现输出了单模激光。2015年, Sato报道了采用输出功率为 $39.3 \mu\text{W}$ 的 LEAP 激光器,展现优越的片上集成性和芯片间光互连能力^[150]。Matsuo^[151]及 Takeda^[152]于 2018 年和 2019 年发表的两篇论文详细介绍了 LEAP 激光器的开发及在光互连领域的应用和 LEAP 激光器的设计与开发。文中提到的 LEAP 激光器采用了埋藏异质结(BH)结构设计,使用 InGaAlAs 量子阱作为有源区,实现了阈值电流低至 $4 \mu\text{A}$ 、能耗低至 $1 \text{ fJ} \cdot \text{bit}^{-1}$ 的 LEAP 激光器。将 LEAP 激光器进行片上和集成光路光互连,采用 6 层量子阱结构 $10 \text{ fJ} \cdot \text{bit}^{-1}$ 能耗传输 $25 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ NRZ 数据,光纤耦合输出功率为 $6.9 \mu\text{W}$ 。并提出了一些目前尚未解决的在光互连领域应用的技术问题,包括提高器件性能、实现硅基集成等,为未来 LEAP 激光器的进一步发展提供了研究方向。紧接着在 2021 年,该公司便报道了 LEAP 激光器与硅基光子集成电路(PIC)的片上集成研究^[153],首次实现了激光器、硅波导和探测器的数据传输,如图 8(c)~(d)所示。

6.1.2 LEAP 激光器特点及前景

随着人工智能和未来光通信技术的迅速发展,我们对低能耗、更高数据传输速率和更广泛光通信应用的需求不断增加。对于短距离数据通信,对功率要求不高,VCSELs 具有更小的有源区体积、更低的发送能耗而得到应用。但 VCSELs 由于 DBR 等寄生电容较大,发送能耗依然在 $100 \text{ fJ} \cdot \text{bit}^{-1}$ 水平, 3 dB 调制带宽限制在 30 GHz ^[6]。而像 LEAP 激光器、纳米梁微腔激光器(Nanobeam cavity laser)、Nanolaser 等纳米腔激光器,具有更小的有源区,从而有更低的发送能耗(小于 $10 \text{ fJ} \cdot \text{bit}^{-1}$)和调制带宽(大于 100 GHz)^[154]。

LEAP 激光器相较于传统激光器,拥有更小的有源区,这有助于降低激光器的功耗,使光传输系统在数据传输速度和功耗方面相较于传统电子传输方式具有优势。进一步缩小有源区打开了光通信系统的新应用领域,即基于硅 CMOS 的片上和片外网络。在 PIC 中,器件的密度要求是一个关键问题,需要在单个芯片上集成数千个激光器、光电探测器和开关,LEAP 激光器有望克服片上电子互连的带宽和功耗限

制。LEAP 的研发实现了极低的阈值电流和较低的能耗, 且其同时具备高品质因子与小模场体积, 减小了设备的热阻并提高了输出功率, 因此采用 LEAP 激光器成为了 CMOS 芯片上构建大规模光子集成电路的理想选择。此外, LEAP 激光器具备波长可控性, 通过调整光子晶体的晶格常数, 实现了超过 100 nm 的波长调节, 可以实现所需波长的激光振荡, 以便适用于波分复用技术。

6.2 光子晶体面发射激光器 (PCSEL)

6.2.1 PCSEL 发展和特点

PCSELs 的主要特点是利用二维光子晶体的布拉格共振实现激光。在光子晶体层中, 由于两种折射率差异较大的材料形成的晶格结构, 一阶布洛赫波和高阶布洛赫波之间会发生耦合, 这种相互作用能够使得满足晶格常数条件的波长进行大面积的二维相干激光振荡。PCSELs 利用光锥之上的 Γ 点的能带边沿 (带边), 在能带结构中不需要形成完整的带隙, 在其能带 Γ 点的光还会通过光子晶体的一级衍射耦合到垂直方向, 形成垂直的面发射输出。PCSEL 激光器具备优异单模输出能力, 能够实现高光束质量和高对称性光束, 其低发散角特性使得光束的方向性更强, 更易于实

现光纤耦合。因此, 与同样面发射的 VCSEL 相比, PCSEL 在功率输出、单模特性、激光线宽、发散角等方面均具备优势, 在激光雷达、激光武器、材料加工、数据通信等领域都具有很高的潜在应用价值^[155-158], 被认为是开拓和填补新应用领域的下一代激光源^[155]。

InP、GaAs 基 PCSELs 起步较早, 第一个 PCSELs 由日本京都大学 Noda 课题组于 1999 年报道^[13]。该团队在 2008 年也实现了第一个 GaN 基 PCSELs^[159]; 2010 年, Canon 公司在 p-GaN 层内引入光子晶体孔, 实现了 406 nm 电泵 PCSELs^[160]。结构如图 9(a)~(b) 所示。这样, PCSEL 的激射波段就涵盖了从近红外到蓝光。目前, 人们对 PCSEL 的研究主要集中在减小面内损耗和实现更大功率性能上。Noda 组报道了面内反馈约束型异质结构光子晶体微腔^[161], 有效减小了面内损耗, 实现了 9 μm 的谐振场面积和大于 40 GHz 的调制带宽, 如图 9(d)~(f) 所示。英国谢菲尔德大学探索研究了多个 PCSEL 单元耦合性能, 示意图如图 9(c) 所示, 证明了多管 PCSEL 实现相干耦合增强输出的可行性^[162]。2023 年, Noda 组先后报道了通过饱和吸收体和脉冲调制实现单脉冲激光峰值达到 200 W 以上^[163]和通过 3 mm 大面

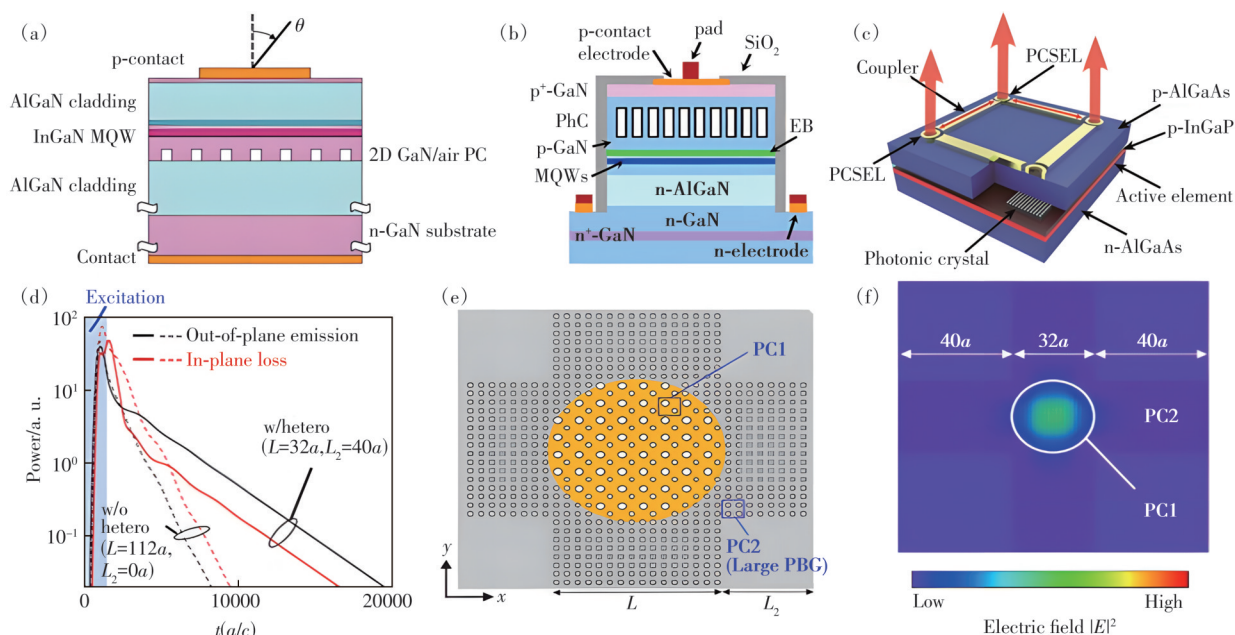


图 9 (a)~(b) 基于掩埋 PhC 的电泵 GaN-PCSELs^[159-160]; (c) 四单元 PCSEL 阵列示意图^[162]; (d) 有异质结构和没有异质结构的面内外损耗; (e) 器件结构俯视图; (f) 光场谐振图^[161]

Fig.9 (a)~(b) GaN-PCSELs with buried PhC electrical pumping^[159-160]. (c) Schematic diagram of four unit PCSEL array^[162]. (d) Change of the out-of-plane emission power and in-plane loss for the PCSEL without and with a heterostructure. (e) Top-view of in-plane heterostructure composed of two photonic crystals with different lattice points. (f) Electric field distribution ($|E|^2$) of the fundamental mode^[161]

积谐振实现连续波功率达到 50 W 的单模高光束质量 GaAs-PCSEL^[164],这在半导体激光器中具

有里程碑式的意义,分别见图 10(a)~(c)和图 10(d)~(e)。

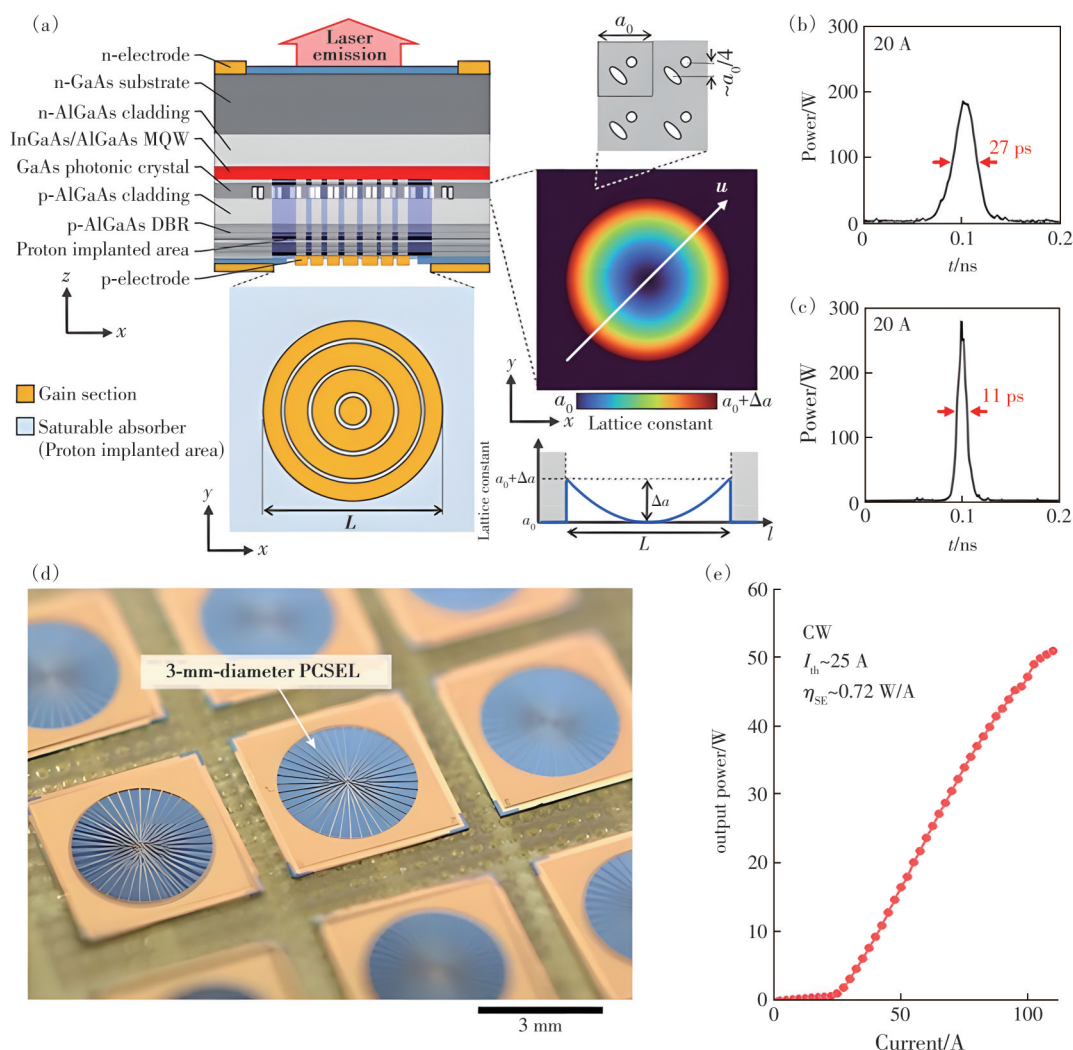


图 10 (a)带有饱和吸收体和双晶格的器件结构示意图;在 20 A 注入电流下的瞬态功率:(b)脉冲调制前,(c)脉冲调制后^[163];(d)所制备的 3 mm 直径 PCSEL 芯片图片;(e)连续波下测试的 I - L 曲线^[164]

Fig.10 (a)Schematic structure of a PCSEL with saturable absorbers and a rotationally symmetric self-evolving double-lattice photonic crystal. Transient power under 20 A injection current: (b)before pulse modulation, (c)after pulse modulation^[163]. (d)Photograph of the fabricated 3-mm-diameter PCSEL chips. (e) I - L characteristics under CW conditions, where the heat sink was cooled by water at 6 °C during measurements^[164]

国内对光子晶体面发射激光器的研究相对较少,原因主要是基于 PCSEL 外延生长技术难度较高。2019 年,长春光机所佟存柱课题组通过 F-P 腔增强反馈实现 1 310 nm 波段的表面刻蚀型 GaAs-PCSEL^[165];2024 年,该课题组报道了掩埋孔的 1 550 nm 连续电泵激射 PCSEL^[166]。

在可见光波段 PCSEL 方面,还不像对近红外波段研究的那样广泛和深入。然而,随着对不同场景和应用需求的需要,对可见光优异半导体光源需求的提升,GaN-PCSEL 已呈现出较大的研

究价值,GaN-PCSEL 是最有望突破现有蓝光激光器瓶颈、实现大功率高性能蓝光激光的优秀候选者。但目前高性能的 GaN-PCSEL 尚待开发,这是因为:(1)与 GaN 体系兼容的低折射率包覆材料的缺失极大地限制了光场在光子晶体和有源区的限制因子;(2)受到材料折射率的限制,电泵 GaN-PCSELs 的实现只能基于掩埋型 PhC,而掩埋孔生长技术难度较高,所以实现 GaN-PCSELs 较困难;(3)GaN 体系光效较低,p-GaN 载流子迁移率低,GaN 衬底同质外延器件成本高,不能

实现高效的电注入结构。在这些问题中,第三个是材料体系固有问题,需要外延生长技术的积累进步。日本在 GaN 基掩埋孔技术和高性能外延生长方面处于领先地位,目前做出的 GaN-PCSEL 单管性能也最为优秀。2022 年, Noda 组报道的基于双晶格结构光子晶体,引入非对称性,成功实现了发射功率大于 1 W 的 GaN 基蓝光 PC-SELS^[167]。2024 年, Noda 组基于 SiO₂ 填充的表面刻蚀型双晶格孔,实现了 GaN-PCSEL 的绿光激射^[168]。南京邮电大学刘启发团队率先在国内开展了 GaN-PCSEL 的研究,针对上述 GaN-PCSEL

的前两个问题,分别提出了多孔 GaN 包覆层和表面光子晶体折射率调控的蓝光 PCSEL^[169-171],实现了高限制因子和品质因子的谐振腔。图 11 为所设计的基于多孔 GaN 包覆层、双晶格光子晶体和多孔 GaN-DBR 增强的 PCSEL 结构图、能带图、谐振场分布及 DBR 增强出射功率。双晶格通过打破电场对称性,提升了激光器的垂直辐射损耗和斜率效率性能;多孔 GaN 作为包覆层,更低的折射率对光场实现了更有效限制,实现了高的限制因子;多孔 GaN-DBR 的背反射增强提升了斜率效率性能。

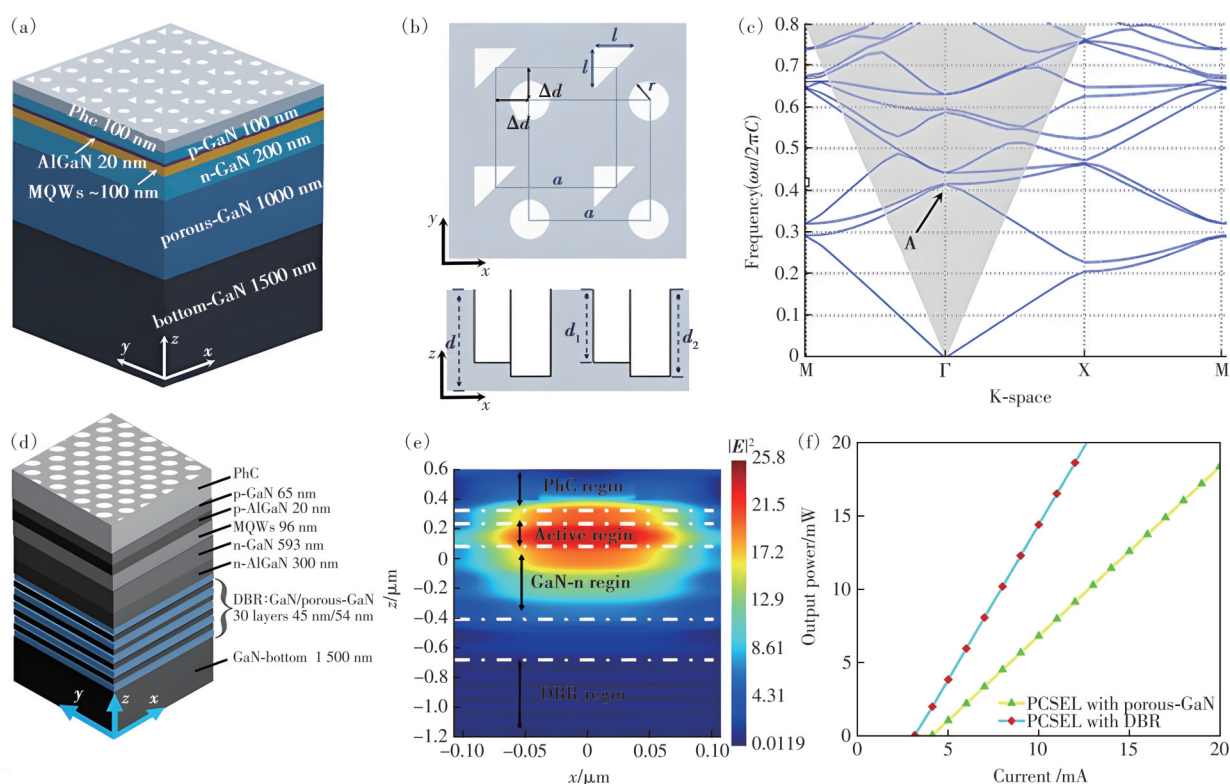


图 11 (a)基于多孔 GaN 和双晶格光子晶体的 GaN-PCSEL 的整体结构;(b)双晶格光子晶体俯视图;(c)能带图和所用的带边模式^[170];(d)基于折射率调控和多孔 GaN-DBR 的 GaN-PCSEL 结构;(e)基模谐振场分布图;(f)DBR 增强激光器斜率效率^[171]

Fig.11 (a)The 3-D schematic illustration of GaN-PCSEL with double-lattice and porous GaN cladding. (b)The top view of the double-lattice photonic crystal. (c)The band diagram of the double lattice photonic crystal cavity^[170]. (d)Structure and parameters diagrams of the proposed PCSEL chips. (e)Field distribution of resonant mode in the cavity. (f)Slope efficiency of PCSEL with DBR structure and PCSEL with porous GaN cladding layer^[171]

6.2.2 PCSEL 应用前景

PCSEL 激光器在未来具有广泛的应用前景,可应用于其研究的材料也十分广泛。GaAs 和 Al-GaAs 材料的 PCSEL 可用于波长范围在 850~980 nm 的 PCSEL 器件,适合短波长和近红外应用。GaN 和 InGaIn 材料的 PCSEL 用于短波长的蓝光和紫外波段,常见于显示技术、激光照明、光存储和材料

加工等应用。与其他激光器相比,PCSEL 的大功率、高光束质量、独特的光子局域化效应和设计灵活性使其在材料加工、激光医疗和非线性光学^[172]等应用中具有重要潜力。同时,其在可见光通信、量子信息处理等新兴领域中具有值得期待的应用前景。在激光雷达领域,PCSEL 可产生高质量、窄发散角的光束,这对于实现高分辨率的三维成像和

目标检测至关重要。此外,二维光束扫描特性^[173]使其在光学系统中实现快速、高精度扫描成为可能,这对自动驾驶、环境感知和工业自动化等应用具有显著优势。PCSEL虽然具有高效、大面积激光输出的优势,但在实际应用中 also 面临一些技术挑战。首先,随着谐振腔尺寸的缩小,面内损耗会显著增加,这使得激光振荡变得更加困难,因此如何有效降低面内损耗成为实现 PCSEL 高速性能的关键问题。其次,为了增强面内耦合强度,需要对光子晶体结构进行精确的特殊设计,使光场尽可能局域在光子晶体区域内,这增加了设计的复杂性。此外,在外延结构设计中,通常需要使用掩埋光子晶体等复杂技术来增强耦合效果,这进一步提高了制作难度和设计复杂度。这些技术上的挑战使得 PCSEL 的开发在制作难度和阈值控制上仍有较大改进空间。

7 结 论

本文深入总结和探讨了 DFB 激光器、WGM 激光器、VCSEL、LEAP 激光器及 PCSEL 等多种易于片上集成的半导体激光器,剖析其工作原理、近些年发展概况、性能特点及应用领域,对比了各类激光器在各自应用场景中的长处与不足。DFB 激光器和 VCSEL 在光通信和消费电子中的成熟应用,为未来光子系统的低功耗和高效能设计提供了宝贵经验;WGM 激光器的高品质因子和低阈值特性拓展了非线性光学和传感应用的新边界。此外,PCSEL 和 LEAP 激光器作为新

兴技术,通过光子晶体结构的优化,实现了高效能与大功率输出,为片上集成系统的发展提供了新思路。

尽管本文尝试全面涵盖这些激光器的核心技术和应用,但鉴于篇幅和技术的复杂性,仍有许多细节未能深入剖析。例如,不同激光器在实际应用中受制于材料、制造工艺和环境的具体影响;随着技术发展,激光器在更长波长、极端环境、超高速传输及新型材料中的性能表现将继续演进,这些都需要进一步的探索和优化。未来的研究可围绕激光器在片上光子集成、电泵激发效率及其在复杂系统中的稳定性展开,以更好地推动半导体激光器在广泛领域中的应用与创新。在面向更加前沿、新兴或交叉的研究上,片上微腔激光器也大有潜力和舞台。如应用在 chiplet 异构集成的微型激光器及其封装问题的研究,片上激光器与光神经网络的结合,片上激光器在可穿戴设备和生化传感检测等特定应用开发,面向片上光互连、光计算等大规模集成光路的系统级硅光集成,基于新物理机制的激光器研究如拓扑光子晶体激光器等,基于片上微腔和 MoS_2/WS_2 等新型材料的新颖激光器和光激射性能,新型有源材料与纳米制造技术结合实现纳米级光场调控和纳米激光器突破等。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250166>

参 考 文 献:

- [1] ZHOU Z P, YIN B, MICHEL J. On-chip light sources for silicon photonics [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2015, 4(1): e358.
- [2] LIU J M, CHEN H F, TANG S. Optical-communication systems based on chaos in semiconductor lasers [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundam. Theory Appl.*, 2001, 48(12):1475-1483.
- [3] ZHOU Z C, OU X P, FANG Y T, *et al.* Prospects and applications of on-chip lasers [J]. *eLight*, 2023, 3(1): 1.
- [4] COLDREN L A, CORZINE S W. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* [M]. New York: Wiley, 1995: 1-613.
- [5] DONG B Z, WAN Y T, CHOW W W, *et al.* Turnkey locking of quantum-dot lasers directly grown on Si [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(7): 669-676.
- [6] MICHALZIK R. *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Press, 2013.
- [7] CHEN Z J, SLUDDS A, DAVIS R, *et al.* Deep learning with coherent VCSEL neural networks [J]. *Nat. Photonics*, 2023, 17(8): 723-730.
- [8] VAHALA K J. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [9] HILL M T, OEI Y S, SMALBRUGGE B, *et al.* Lasing in metallic-coated nanocavities [J]. *Nat. Photonics*, 2007, 1(10): 589-594.

- [10] CHO S, YANG Y, SOLJAČIĆ M, *et al.* Plasmonic hinge modes in metal-coated nanolasers [J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(43): 13647-13652.
- [11] OTA Y, KAKUDA M, WATANABE K, *et al.* Thresholdless quantum dot nanolaser [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(17): 19981-19994.
- [12] HIROSE K, LIANG Y, KUROSAKA Y, *et al.* Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers [J]. *Nat. Photonics*, 2014, 8(5): 406-411.
- [13] IMADA M, NODA S, CHUTINAN A, *et al.* Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(3): 316-318.
- [14] 陆丹, 杨秋露, 王皓, 等. 通信波段半导体分布反馈激光器 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701001.
LU D, YANG Q L, WANG H, *et al.* Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(7): 0701001. (in Chinese)
- [15] CHEN H, CHEN Y Y, GAO F, *et al.* Narrow-strip 670 nm gain-coupled distributed feedback laser based on periodic anodes fabricated by I-line lithography [J]. *IEEE Photonics J.*, 2019, 11(3): 1502009.
- [16] 张平, 王凌, 冯华君, 等. 光纤连接器端面检测技术 [J]. 光学仪器, 2002, 24(3): 3-7.
ZHANG P, WANG L, FENG H J, *et al.* A testing technology for optical fiber connector end surface [J]. *Opt. Instrum.*, 2002, 24(3): 3-7. (in Chinese)
- [17] HU L Y, ZENG X, WEI X Q, *et al.* Interface engineering for enhancing electrocatalytic oxygen evolution of NiFe LDH/NiTe heterostructures [J]. *Appl. Catal. B: Environ.*, 2020, 273: 119014.
- [18] MCCALL S L, LEVI A F J, SLUSHER R E, *et al.* Whispering-gallery mode microdisk lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60(3): 289-291.
- [19] LYON A R, COOK C R, BROWN E C, *et al.* Assessing organizational implementation context in the education sector: confirmatory factor analysis of measures of implementation leadership, climate, and citizenship [J]. *Implement. Sci.*, 2018, 13(1): 5.
- [20] 蔡瑞涛, 王梦宇, 李雅婷, 等. 超高 Q 值光学微腔光谱信号采集系统设计与分析 [J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0513001.
CAI R T, WANG M Y, LI Y T, *et al.* Design and analysis of spectral signal acquisition system based on ultra-high Q factor optical microcavity [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(5): 0513001. (in Chinese)
- [21] OKUR S, SCHELLER M, SEURIN J F, *et al.* High-power VCSEL arrays with customized beam divergence for 3D-sensing applications [C]. *Proceedings of SPIE 10938, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVIII, San Francisco, California, USA*, 2019: 109380F.
- [22] 潘绍驰, 田思聪, 王品尧, 等. 高速光子晶体面发射激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2024, 45(3): 484-492.
PAN S C, TIAN S C, WANG P Y, *et al.* Research progress on high-speed photonic crystal surface-emitting lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(3): 484-492. (in Chinese)
- [23] SHAPIRO J H, KUMAR P, SALEH B E A, *et al.* Theory of light detection in the presence of feedback [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1987, 4(10): 1604-1620.
- [24] 韩威, 张雅丽, 张艳, 等. 注入锁定法布里-珀罗激光器的单模工作特性 [J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1318-1322.
HAN W, ZHANG Y L, ZHANG Y, *et al.* Single mode operation of an injection locked Fabry-Perot laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, 35(9): 1318-1322. (in Chinese)
- [25] KOGELENIK H, SHANK C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, 43(5): 2327-2335.
- [26] KOGELENIK H, SHANK C V. Stimulated emission in a periodic structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 18(4): 152-154.
- [27] NAKAMURA M, YARIV A, YEN H W, *et al.* Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 22(10): 515-516.
- [28] KOBAYASHI K, FUJIMOTO N, SUGIMOTO M, *et al.* High-power and high-efficiency 1.3- μm DFB laser diodes for long-haul optical communication systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2011, 17(6): 1523-1530.
- [29] 郭剑. 多波长分布反馈半导体激光器阵列的理论与实验研究 [D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2012.
GUO J. *Theoretical Analysis and Experiment Research of Multi-Wavelength Distributed Feedback Laser Arrays* [D]. Wuhan: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2012. (in Chinese)

- [30] NAKAHARA K, TSUCHIYA T, KITATANI T, *et al.* 40-Gb/s direct modulation with high extinction ratio operation of 1.3- μm InGaAlAs multiquantum well ridge waveguide distributed feedback lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2007, 19(19): 1436-1438.
- [31] MATSUI Y, PHAM T, SUDO T, *et al.* 28-Gbaud PAM4 and 56-Gb/s NRZ performance comparison using 1 310-nm Al-BH DFB laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2016, 34(11): 2677-2683.
- [32] LIU G H, ZHAO G Y, SUN J Q, *et al.* Experimental demonstration of DFB lasers with active distributed reflector [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(23): 29784-29795.
- [33] 李杨, 冯源, 李洋, 等. 大功率分布反馈半导体激光器研究进展 [J]. 微纳电子技术, 2018, 55(6): 388-396.
LI Y, FENG Y, LI Y, *et al.* Research progress of high power distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Micronano-electron. Technol.*, 2018, 55(6): 388-396. (in Chinese)
- [34] CHE D, MATSUI Y, SCHATZ R, *et al.* Direct modulation of a 54-GHz distributed Bragg reflector laser with 100-Gbaud PAM-4 and 80-Gbaud PAM-8 [C]. *Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, California, USA*, 2020: 1-3.
- [35] ABDELLI K, RAFIQUE D, GRIEBER H, *et al.* Lifetime prediction of 1 550 nm DFB laser using machine learning techniques [C]. *Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego*, 2020: 1-3.
- [36] NAKAJIMA T, ONGA M, SEKINO Y, *et al.* 106-Gb/s PAM4 operation of directly modulated DFB lasers from 25 to 70 °C for transmission over 2-km SMF in the CWDM range [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2022, 40(6): 1815-1820.
- [37] RIZZO A, NOVICK A, GOPAL V, *et al.* Massively scalable Kerr comb-driven silicon photonic link [J]. *Nat. Photonics*, 2023, 17(9): 781-790.
- [38] HUANG J J S, HUANG S C, WU N, *et al.* High-reliability, high-performance 25 Gb/s directly modulated uncooled lasers for 5G wireless communications [J]. *Appl. Sci. Innovative Res.*, 2021, 5(1): 56-64.
- [39] SONG H, ZHANG R K, LU D, *et al.* High-power (500 mW) narrow-linewidth (21 kHz) low-RIN (-168 dB/Hz) distributed feedback laser [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(3): 5287-5295.
- [40] LI H, ZHU X Y, GUO J, *et al.* Effects of active section length on directly modulated 1.3 μm InGaAlAs/InP DFB lasers with a MQW-based passive DBR section [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(6): 13586-13593.
- [41] YOSHIKUNI Y, OE K, MOTOSUGI G, *et al.* Broad wavelength tuning under single-mode oscillation with a multi-electrode distributed feedback laser [J]. *Electron. Lett.*, 1986, 22(22): 1153-1154.
- [42] AGRAWAL G P, GEUSIC J E, ANTHONY P J. Distributed feedback lasers with multiple phase-shift regions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53(3): 178-179.
- [43] THIIS P J A, TIEMEIJER L F, BINSMA J J M, *et al.* Progress in long-wavelength strained-layer InGaAs(P) quantum-well semiconductor lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, 30(2): 477-499.
- [44] MORTHER G, VANKWIKELBERGE P, DAVID K, *et al.* Improved performance of AR-coated DFB lasers for the introduction of gain coupling [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1990, 2(3): 170-172.
- [45] LIU G H, ZHAO G Y, ZHANG G, *et al.* Directly modulated active distributed reflector distributed feedback lasers over wide temperature range operation (-40 to 85 °C) [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2020, 18(6): 061401.
- [46] ZHU X Y, GUO J, LI H, *et al.* High speed directly modulated DFB lasers having MQW based passive reflectors [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2023, 35(6): 333-336.
- [47] NAKAHARA K, SUGA K, OKAMOTO K, *et al.* 112-Gb/s PAM-4 uncooled (25 °C to 85 °C) directly modulation of 1.3- μm InGaAlAs-MQW DFB BH lasers with record high bandwidth [C]. *Proceedings of the 45th European Conference on Optical Communication (ECOC), Dublin*, 2019: 1-3.
- [48] YAMAOKA S, DIAMANTOPOULOS N P, NISHI H, *et al.* Directly modulated membrane lasers with 108 GHz bandwidth on a high-thermal-conductivity silicon carbide substrate [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(1): 28-35.
- [49] QIU P P, ZHOU H J, WANG T X, *et al.* Low-threshold 795 nm oxide-confined distributed feedback lasers with surface gratings [J]. *IEEE Photonics J.*, 2023, 15(6): 1502607.
- [50] MA X, QI H F, DING Y D, *et al.* Demonstration of a three-active-section DFB laser with photon-photon resonance and detuned loading effects to obtain enhanced bandwidth and maintained high output power [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2025, 182: 112127.
- [51] 杜海涛, 邹建, 姬兴. 半导体激光器阈值电流测试方法研究 [J]. 激光与红外, 2010, 40(8): 847-850.

- DU H T, ZOU J, JI X. Research on the measurement of semiconductor laser threshold current [J]. *Laser Infrared*, 2010, 40(8): 847-850. (in Chinese)
- [52] 李瑞冬, 邹永刚, 田锐, 等. 侧向耦合分布反馈半导体激光器光栅结构及耦合特性 [J]. *发光学报*, 2021, 42(12): 1921-1927.
- LI R D, ZOU Y G, TIAN K, *et al.* Grating structure and coupling characteristics of laterally-coupled distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(12): 1921-1927. (in Chinese)
- [53] 李孝峰, 潘炜, 罗斌, 等. 理论研究电流注入对垂直腔面发射激光器多横模行为的影响 [J]. *光学技术*, 2006, 32(1): 59-64.
- LI X F, PAN W, LUO B, *et al.* Theoretical investigation on influence of injection current on multi-transverse-mode behaviors of VCSELs [J]. *Opt. Tech.*, 2006, 32(1): 59-64. (in Chinese)
- [54] 陈博, 王圩, 张静媛, 等. 1.3 μm InGaAsP/InP 应变多量子阱部分增益耦合 DFB 激光器 [J]. *半导体学报*, 1998, 19(10): 793-797.
- CHEN B, WANG W, ZHANG J Y, *et al.* 1.3 μm InGaAsP/InP strained MQW complex coupled DFB lasers [J]. *J. Semicond.*, 1998, 19(10): 793-797. (in Chinese)
- [55] 胡星, 程德江, 郭芷妍, 等. 914 nm LD 泵浦 RTP 电光调 Q 的高效率 Nd:YVO₄ 激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0105001.
- HU X, CHENG D J, GUO Z Y, *et al.* Highly efficient RTP electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser by end-pumping at 914 nm [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2019, 48(1): 0105001. (in Chinese)
- [56] 牛帅, 宋燕, 张玲, 等. 光通信单片集成 DFB 激光阵列研究进展 [J]. *水晶*, 2022, 12(7): 1006.
- NIU S, SONG Y, ZHANG L, *et al.* Research progress of monolithic integrated DFB laser arrays for optical communication [J]. *Crystal*, 2022, 12(7): 1006. (in English)
- [57] 陈良惠, 杨国文, 刘育街. 半导体激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500001.
- CHEN L H, YANG G W, LIU Y X. Development of semiconductor lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(5): 0500001. (in Chinese)
- [58] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)
- [59] 杨柳, 庄永勇, 刘阳, 等. 回音壁模式光学谐振腔研究进展 [J]. *大学物理*, 2021, 40(5): 41-54.
- YANG L, ZHUANG Y Y, LIU Y, *et al.* Progress of whispering gallery mode resonator [J]. *Coll. Phys.*, 2021, 40(5): 41-54. (in Chinese)
- [60] WALSH P, KEMENY G. Laser operation without spikes in a ruby ring [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, 34(4): 956-957.
- [61] JIA Y, CHEN F. Recent progress on femtosecond laser micro-/nano-fabrication of functional photonic structures in dielectric crystals: A brief review and perspective [J]. *APL Photonics*, 2023, 8(9): 090901.
- [62] NIU B, SHI X Y, GE K, *et al.* An all-optical tunable polymer WGM laser pumped by a laser diode [J]. *Nanoscale Adv.*, 2022, 4(9): 2153-2158.
- [63] TAMBOLI A C, HABERER E D, SHARMA R, *et al.* Room-temperature continuous-wave lasing in GaN/InGaN microdisks [J]. *Nat. Photonics*, 2007, 1: 61-64.
- [64] MUNSCH M, CLAUDON J, MALIK N S, *et al.* Room temperature, continuous wave lasing in microcylinder and microring quantum dot laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(3): 031111.
- [65] LEVY J S, FOSTER M A, GAETA A L, *et al.* Harmonic generation in silicon nitride ring resonators [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(12): 11415-11421.
- [66] CHEN R, TA V D, SUN H D. Single mode lasing from hybrid hemispherical microresonators [J]. *Sci. Rep.*, 2012, 2: 244.
- [67] KIM C M, CHO J, LEE J, *et al.* Continuous wave operation of a spiral-shaped microcavity laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(13): 131110.
- [68] WIERSIG J, HENTSCHEL M. Combining directional light output and ultralow loss in deformed microdisks [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100(3): 033901.
- [69] SHINOHARA S, HENTSCHEL M, WIERSIG J, *et al.* Ray-wave correspondence in limaçon-shaped semiconductor microcavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 80(3): 031801.

- [70] SONG Q H, GE L, STONE A D, *et al.* Directional laser emission from a wavelength-scale chaotic microcavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105(10): 103902.
- [71] JIANG X F, XIAO Y F, ZOU C L, *et al.* Highly unidirectional emission and ultralow-threshold lasing from on-chip ultra-high- Q microcavities [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(35): OP260-OP264.
- [72] WIERSIG J. Perturbative approach to optical microdisks with a local boundary deformation [J]. *Phys. Rev. A*, 2012, 85(6): 063838.
- [73] REDDING B, GE L, SONG Q H, *et al.* Manipulation of high-order scattering processes in ultrasmall optical resonators to control far-field emission [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112(16): 163902.
- [74] KRAFT M, WIERSIG J. Perturbative analysis of whispering-gallery modes in limaçon-shaped microcavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2014, 89(2): 023819.
- [75] YANG Y D, HUANG Y Z. Mode characteristics and directional emission for square microcavity lasers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016, 49(25): 253001.
- [76] YANG Y D, TANG M, WANG F L, *et al.* Whispering-gallery mode hexagonal micro-/nanocavity lasers [Invited] [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(5): 594-607.
- [77] MA C G, XIAO J L, XIAO Z X, *et al.* Chaotic microlasers caused by internal mode interaction for random number generation [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 187.
- [78] LI J C, XIAO J L, YANG Y D, *et al.* Nonlinear dynamics in a circular-sided square microcavity laser [J]. *Photonics Res.*, 2023, 11(11): A97-A106.
- [79] VAN CAMPENHOUT J, ROJO-ROMEO P, REGRENY P, *et al.* Electrically pumped InP-based microdisk lasers integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(11): 6744-6749.
- [80] HEIL T, FISCHER I, ELSÄBER W, *et al.* Delay dynamics of semiconductor lasers with short external cavities: bifurcation scenarios and mechanisms [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, 67(6): 066214.
- [81] DAI J, XU C X, SUN X W. ZnO-microrod/p-GaN heterostructured whispering-gallery-mode microlaser diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2011, 23(35): 4115-4119.
- [82] LI Z X, LIU W, WANG R, *et al.* Interface design for electrically pumped ultraviolet nanolaser from single ZnO-nanorod [J]. *Nano Energy*, 2022, 93: 106832.
- [83] FENG M X, HE J L, SUN Q, *et al.* Room-temperature electrically pumped InGaN-based microdisk laser grown on Si [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(4): 5043-5051.
- [84] LI K H, CHEUNG Y F, FU W Y, *et al.* Electrically injected whispering-gallery mode InGaN/GaN microdisks [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(10): 101106.
- [85] YANG X, SHAN C X, NI P N, *et al.* Electrically driven lasers from van der Waals heterostructures [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(20): 9602-9607.
- [86] ZHOU X B, JIANG M M, WU J F, *et al.* Electrically driven whispering-gallery-mode microlasers in an n-MgO@ZnO:Ga microwire/p-GaN heterojunction [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(11): 18273-18286.
- [87] BASHAR S B, WU C X, SUJA M, *et al.* Electrically pumped whispering gallery mode lasing from Au/ZnO microwire Schottky junction [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2016, 4(12): 2063-2067.
- [88] XU K, WAN P, LIU M S, *et al.* High Q -factor and low threshold electrically pumped single-mode microlaser based on a single-microwire double-heterojunction device [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(8): 3276-3287.
- [89] ZHU G Y, LI J P, LI J T, *et al.* Single-mode ultraviolet whispering gallery mode lasing from a floating GaN microdisk [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(4): 647-650.
- [90] ZHU G Y, HE S Q, LI J P, *et al.* GaN micro-chimney cavity laser [J]. *Opt. Commun.*, 2020, 474: 126054-126057.
- [91] ZHU G Y, TIAN M F, ALMOKHTAR M, *et al.* Whispering gallery mode lasing performance's evolution of floating GaN microdisks varying with their thickness [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2022, 39(12): 123401.
- [92] QIN F F, ZHU G Y, WANG R, *et al.* Thermal effect induced dynamically lasing mode tuning in GaN whispering gallery microcavities [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021, 54(25): 255103.
- [93] QIN F F, JI X, YANG Y, *et al.* Lasing mode manipulation in a Benz-shaped GaN cavity *via* the Joule effect of individual Ni wires [J]. *Nanotechnology*, 2023, 34(28): 285208.
- [94] QIN F F, ZHU G Y, YANG J B, *et al.* Unidirectional single-mode lasing realization and temperature-induced mode

- switching in asymmetric GaN coupled cavities [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(5): 1921-1928.
- [95] FU W Y, CHEUNG Y F, CHOI H W. High performance electrically-injected InGaN microdisk lasers through simultaneous enhancement of optical confinement and overlap factor [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(8): 2400047.
- [96] LAFALCE E, ZENG Q, LIN C H, *et al.* Robust lasing modes in coupled colloidal quantum dot microdisk pairs using a non-Hermitian exceptional point [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 561.
- [97] 夏伟, 邓麦雨, 雍蓉蓉, 等. 回音壁微腔协同的表面增强拉曼散射生物传感 [J]. *发光学报*, 2025, 46(2): 229-244.
- XIA W, DENG M Y, YONG R R, *et al.* SERS biosensing synergistically enhanced by whispering gallery mode microcavity [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(2): 229-244. (in Chinese)
- [98] WANG Y Y, XU C X, JIANG M M, *et al.* Lasing mode regulation and single mode realization in ZnO whispering gallery microcavities by the Vernier effect [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(37): 16631-16639.
- [99] LIHACHEV G, RIEMENSBERGER J, WENG W L, *et al.* Low-noise frequency-agile photonic integrated lasers for coherent ranging [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 3522.
- [100] WONG W W, JAGADISH C, TAN H H. III - V semiconductor whispering-gallery mode micro-cavity lasers: Advances and prospects [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2022, 58(4): 2000618.
- [101] 刘茂生, 王金辉, 阚彩侠, 等. 氧化锌微纳结构紫外发光与激光器件研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(2): 203-228.
- LIU M S, WANG J H, KAN C X, *et al.* Recent developments of light-emitting and laser devices based on zinc oxide micro-/nanostructures [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(2): 203-228. (in Chinese)
- [102] TARASOV A P, MUSLIMOV A E, KANECSKY V M. Excitonic mechanisms of stimulated emission in low-threshold ZnO microrod lasers with whispering gallery modes [J]. *Materials*, 2022, 15(24): 8723.
- [103] LI H Q, WANG Z C, WANG L, *et al.* Optically pumped milliwatt whispering-gallery microcavity laser [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2023, 12(1): 223.
- [104] 黄永箴, 杨跃德, 王世江, 等. 适于光子集成及光互连的回音壁微腔半导体激光器 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(5): 546-551.
- HUANG Y Z, YANG Y D, WANG S J, *et al.* Whispering-gallery microcavity semiconductor lasers suitable for photonic integrated circuits and optical interconnects [J]. *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.*, 2010, 40(5): 546-551. (in Chinese)
- [105] HAO S, SUEBKA S, SU J. Single 5-nm quantum dot detection via microtoroid optical resonator photothermal microscopy [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 195.
- [106] SUEN N T, HUNG S F, QUAN Q, *et al.* Electrocatalysis for the oxygen evolution reaction: recent development and future perspectives [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2017, 46(2): 337-365.
- [107] WARD J, BENSON O. WGM microresonators: sensing, lasing and fundamental optics with microspheres [J]. *Laser & Photonics Rev.*, 2011, 5(4): 553-570.
- [108] ARMANI D K, KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, *et al.* Ultra-high-*Q* toroid microcavity on a chip [J]. *Nature*, 2003, 421(6926): 925-928.
- [109] TOROPOV N, CABELLO G, SERRANO M P, *et al.* Review of biosensing with whispering-gallery mode lasers [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 42.
- [110] 李文媛, 付鑫鹏, 姚聪, 等. 基于回音壁模式光学微腔的低阈值激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(12): 1823-1838.
- LI W Y, FU X P, YAO C, *et al.* Research progress of low threshold laser based on whispering gallery mode microcavity [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(12): 1823-1838. (in Chinese)
- [111] MAAS D J H C, BELLANCOURT A R, RUDIN B, *et al.* Vertical integration of ultrafast semiconductor lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, 88(3): 493-497.
- [112] IGA K. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, 47(1R): 1-10.
- [113] SODA H, IGA K I, KITAHARA C, *et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [114] TIAN S C, AHAMED M, BIMBERG D. Progress in short wavelength energy-efficient high-speed vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication [J]. *Photonics*, 2023, 10(4): 410.
- [115] LIU H, MIAO P, XIAO Y, *et al.* High performance multi-junction VCSELs for LiDAR applications [C]. *Proceedings of*

- SPIE* 12020, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXVI, San Francisco, California, USA*, 2022: 1202005.
- [116] GHODS A, DUMMER M, XU G Y, *et al.* Design and fabrication of single-mode multi-junction 905 nm VCSEL with integrated anti-phase mode filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41(10): 3102-3107.
- [117] TIAN S C, AHAMED M, LARISCH G, *et al.* Novel energy-efficient designs of vertical-cavity surface emitting lasers for the next generations of photonic systems [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2022, 61(SK): SK0801.
- [118] ZHANG X W, NING Y Q, QIN L, *et al.* The design and analysis of sub-wavelength metal-grating large-aperture VCSELs [J]. *Appl. Phys. B*, 2012, 109(1): 171-175.
- [119] HASSAN A M A, GU X D, NAKAHAMA M, *et al.* High power and high beam quality surface grating VCSEL [C]. *Proceedings of 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA*, 2021: 1-2.
- [120] XIAO Y, WANG J, LIU H, *et al.* Multi-junction cascaded vertical-cavity surface-emitting laser with a high power conversion efficiency of 74% [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 60.
- [121] JEWELL J L, LEE Y H, WALKER S, *et al.* Low-threshold electrically pumps vertical-cavity surface-emitting microlasers [J]. *Electron. Lett.*, 1989, 25(17): 1123-1124.
- [122] CHENG C H, CHANG-HASNHAIN C, *et al.* VCSEL for communication and sensing [J]. *Opto-Electron. Adv.*, 2018, 1(4): 170018.
- [123] BANWELL T C, VON L A C, CORDELL R R. VCSE laser transmitters for parallel data links [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, 29(2): 635-644.
- [124] LU T J, KAO C C, KUO H C, *et al.* CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92: 141102.
- [125] JOHNSON K, HIBBS-BRENNER M. High output power 670 nm VCSELs [C]. *Proceedings of SPIE 6484, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XI, San Jose, California, United States*, 2007, 6484: 648404.
- [126] 李小路, 周依尔, 毕腾飞, 等. 轻量型感知激光雷达关键技术发展综述 [J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1910002.
- LI X L, ZHOU Y E, BI T F, *et al.* Review on key technologies of lightweight type-aware LiDAR [J]. *Chin. J. Lasers*, 2022, 49(19): 1910002. (in Chinese)
- [127] MOSER P, LOTT J A, WOLF P, *et al.* 56 fJ dissipated energy per bit of oxide-confined 850 nm VCSELs operating at 25 Gbit/s [J]. *Electron. Lett.*, 2012, 48(20): 1292-1294.
- [128] MOSER P, LOTT J A, BIMBERG D. Energy efficiency of directly modulated oxide-confined high bit rate 850-nm VCSELs for optical interconnects [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2013, 19(4): 1702212.
- [129] HOSER M, KAISER W, QUANDT D, *et al.* Highly reliable 106 Gb/s PAM-4 850 nm multi-mode VCSEL for 800 G ethernet applications [C]. *Proceedings of 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego*, 2022: 1-3.
- [130] LUMENTUM OPERATIONS LLC. 400 W 905 nm multi-junction VCSEL array M53-100 [EB/OL]. (2022-04-22) [2025-07-04]. <https://resource.lumentum.com/s3fs-public/technical-library-items/400w905nmvcsel-ds-oc-ae.pdf>.
- [131] 王志鹏, 关宝璐, 张峰, 等. 内腔亚波长光栅液晶可调谐垂直腔面发射激光器 [J]. *物理学报*, 2021, 70(22): 224208.
- WANG Z P, GUAN B L, ZHANG F, *et al.* Liquid crystal tunable vertical cavity surface emission laser with inner cavity sub-wavelength grating [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2021, 70(22): 224208. (in Chinese)
- [132] ZHANG C, LI H J, LIANG D. Antireflective vertical-cavity surface-emitting laser for LiDAR [J]. *Nat. Commun.*, 15(1): 1105.
- [133] SHIOMI M, KISHIMOTO H, WATANABE T, *et al.* Electrically pumped laser oscillation of C-band InAs quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers on InP(311)B substrate [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(6): 12982-12988.
- [134] FENG M, WU C H, HOLONYAK N. Oxide-confined VCSELs for high-speed optical interconnects [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2018, 54(3): 2400115.
- [135] POULADI S, LEE Y G, KIM N I, *et al.* Inverted junction VCSEL arrays operating at 940 nm with >5 W employing tunnel junction [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2024, 36(23): 1369-1372.
- [136] 詹俊鹏, 李鹏. 基于 Altera FPGA 的千兆以太网实现方案 [J]. *电子设计工程*, 2009, 17(2): 50-52.

- ZHAN J P, LI P. Design method of triple speed ethernet based on Altera FPGA [J]. *Electron. Des. Eng.*, 2009, 17(2): 50-52. (in Chinese)
- [137] DAI Y, FU T, CHEN J, *et al.* High-power semiconductor laser with a narrow linewidth based on transverse photonic crystal [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(20): 36010-36020.
- [138] MILLER M, GRABHERR M, KING R, *et al.* Improved output performance of high-power VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2001, 7(2): 210-216.
- [139] CHENG C H, SHEN C C, KAO H Y, *et al.* 850/940-nm VCSEL for optical communication and 3D sensing [J]. *Opto-Electron. Adv.*, 2018, 1(3): 180005.
- [140] ZHANG J, ZHENG W, LIU A. Polarized vertical-cavity surface-emitting laser arrays with asymmetrical structures for three-dimensional sensing with polarization imaging [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2023, 59(5): 2400408.
- [141] LI C, CHEN H, ZHANG S, *et al.* Wearable and biocompatible blood oxygen sensor based on heterogeneously integrated lasers on a laser-induced graphene electrode [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2022, 4(4): 1583-1591.
- [142] ZHANG M, ZHAO J, GUO S. *et al.* Multi-sensors image fusion method for non-destructive inspection in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Int. J. Mach. Learn. & Cyber*, 2025, 16: 3521-3537.
- [143] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [144] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [145] MATSUO S, TAKEDA K, SATO T, *et al.* Room-temperature continuous-wave operation of lateral current injection wavelength-scale embedded active-region photonic-crystal laser [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(4): 3773-3780.
- [146] TAKEDA K, SATO T, SHINYA A, *et al.* Continuous-wave operation of electrically driven wavelength-scale embedded active-region photonic-crystal lasers at room temperature [C]. *Proceedings of 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA*, 2012: 1-2.
- [147] TAKEDA K, SATO T, SHINYA A, *et al.* Few-fJ/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers [J]. *Nat. Photonics*, 2013, 7(7): 569-575.
- [148] SATO T, TAKEDA K, SHINYA A, *et al.* High temperature operation of lambda-scale embedded active-region photonic-crystal lasers [C]. *Proceedings of 2013 IEEE Photonics Conference, Bellevue, WA, USA*, 2013: 252-253.
- [149] SHINYA A, SATO T, TAKEDA K, *et al.* Single-mode lasing of lambda-scale embedded active-region photonic-crystal (LEAP) laser with in-line coupled waveguide [C]. *Proceedings of 2013 IEEE Photonics Conference, Bellevue, WA, USA*, 2013: 448-449.
- [150] SATO T, TAKEDA K, SHINYA A S, *et al.* Photonic crystal lasers for chip-to-chip and on-chip optical interconnects [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2015, 21(6): 4900410.
- [151] MATSUO S, TAKEDA K. λ -scale embedded active region photonic crystal (LEAP) lasers for optical interconnects [J]. *Photonics*, 2019, 6(3): 82.
- [152] TAKEDA K, FUJII T, KURAMOCHI E, *et al.* Reduction of cavity length in λ -scale embedded active-region photonic crystal (LEAP) lasers [C]. *Proceedings of 2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC), Santa Fe, NM, USA*, 2018: 1-2.
- [153] TAKEDA K, TSURUGAYA T, FUJII T, *et al.* Optical links on silicon photonic chips using ultralow-power consumption photonic-crystal lasers [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(16): 26082-26092.
- [154] ALTUG H, ENGLUND D, VUČKOVIĆ J. Ultrafast photonic crystal nanocavity laser [J]. *Nat. Phys.*, 2006, 2(7): 484-488.
- [155] ZHOU W D, PAN M S. The future of photonic crystal surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(14): 140501.
- [156] FEEZELL D F. Status and future of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [C]. *Proceedings of SPIE 9363, Gallium Nitride Materials and Devices X, San Francisco*, 2015: 93631G.
- [157] PENG C Y, CHENG H T, HONG Y H, *et al.* Performance analyses of photonic-crystal surface-emitting laser: Toward high-speed optical communication [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2022, 17(1): 90.
- [158] YOSHIDA M, DE ZOYSA M, ISHIZAKI K, *et al.* Photonic-crystal lasers with high-quality narrow-divergence symmetric beams and their application to LiDAR [J]. *J. Phys. Photonics*, 2021, 3(2): 022006.

- [159] MATSUBARA H, YOSHIMOTO S, SAITO H, *et al.* GaN photonic-crystal surface-emitting laser at blue-violet wavelengths [J]. *Science*, 2008, 319(5862): 445-447.
- [160] KAWASHIMA S, KAWASHIMA T, NAGATOMO Y, *et al.* GaN-based surface-emitting laser with two-dimensional photonic crystal acting as distributed-feedback grating and optical cladding [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(25): 251112.
- [161] INOUE T, YOSHIDA M, ZOYSA M D, *et al.* Design of photonic-crystal surface-emitting lasers with enhanced in-plane optical feedback for high-speed operation [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(4): 5050-5057.
- [162] TAYLOR R J E, CHILDS D T D, IVANOV P, *et al.* Electronic control of coherence in a two-dimensional array of photonic crystal surface emitting lasers [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5: 13203.
- [163] MORITA R, INOUE T, UEDA T, *et al.* 200-W short-pulse operation of photonic-crystal lasers based on simultaneous absorptive and radiative *Q*-switching [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(19): 31116-31123.
- [164] YOSHIDA M, KATSUNO S, INOUE T, *et al.* High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser [J]. *Nature*, 2023, 618(7966): 727-732.
- [165] LU H Y, TIAN S C, TONG C Z, *et al.* Extracting more light for vertical emission: high power continuous wave operation of 1.3- μm quantum-dot photonic-crystal surface-emitting laser based on a flat band [J]. *Light-Sci. Appl.*, 2019, 8: 108.
- [166] WANG Z Y, LIU X, WANG P Y, *et al.* Continuous-wave operation of 1 550 nm low-threshold triple-lattice photonic-crystal surface-emitting lasers [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 44.
- [167] EMOTO K, KOIZUMI T, HIROSE M, *et al.* Wide-bandgap GaN-based watt-class photonic-crystal lasers [J]. *Commun. Mater.*, 2022, 3(1) 72.
- [168] TAGUCHI N, IWAI A, NOGUCHI M, *et al.* Green-wavelength GaN-based photonic-crystal surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Express*, 2024, 17(1): 012002.
- [169] LIU Q F, MENG M J, MA S, *et al.* Design of double-lattice GaN-PCSEL based on triangular and circular holes [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(26): 43615-43629.
- [170] 刘启发, 刘珂, 李皖晴, 等. 基于场分布调控和多孔氮化镓 DBR 的蓝光光子晶体面发射激光器设计 [J]. *光学学报*, 2024, 44(20): 2014003.
LIU Q F, LIU K, LI W Q, *et al.* Design of blue band photonic-crystal surface-emitting lasers based on field distribution modulation and porous GaN DBR [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2024, 44(20): 2014003. (in Chinese)
- [171] LIU Q F, BIN J T, FENG K R, *et al.* Design of GaN-based photonic crystal surface emitting lasers with top TiO_2 photonic crystals [J]. *Results Phys.*, 2022, 33: 105164.
- [172] NODA S, INOUE T, YOSHIDA M, *et al.* High-power and high-beam-quality photonic-crystal surface-emitting lasers: a tutorial [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2023, 15(4): 977-1032.
- [173] YOKOUCHI N, DANNER A J, CHOQUETTE K D. Two-dimensional photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2003, 9(5): 1439-1445.



刘启发(1981-),男,山东淄博人,博士,副教授,硕士生导师,2013年于上海交通大学获得博士学位,主要从事氮化镓基蓝光激光器的研究。
E-mail: liuqf@njupt.edu.cn



朱刚毅(1980-),男,河南洛阳人,博士,副教授,硕士生导师,2013年于东南大学获得博士学位,主要从事微纳光电器件的研究。
E-mail: zhugangyi@njupt.edu.cn



曹宇翼(2005-),男,江苏苏州人,在读本科生,主要从事半导体微腔特性的研究。
E-mail: p23000627@njupt.edu.cn