

文章编号: 1000-7032(2026)04-0582-20

高亮度边发射半导体激光器及其脉冲驱动研究进展

高翔^{1,2}, 刘祥^{1,2}, 薛晓娥^{1*}, 崔晓宁^{1,2}, 郑思睿^{1,2},
SANA Fatima^{1,2}, 汪丽杰³, 佟存柱³, 田思聪^{1*}, BIMBERG Dieter^{1,4*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, Bimberg 中德绿色光子学研究中心 &

特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130031;

4. 柏林工业大学 固体物理研究所纳米光学中心, 德国 柏林 D-10623)

摘要: 高亮度边发射半导体激光器具有高电光转换效率、高光束质量、高峰值功率等优势, 在材料加工、医疗和激光雷达等领域得到了广泛应用。然而, 实现兼具高输出功率与高光束质量的边发射激光器仍面临挑战, 这一难点也成为高亮度边发射半导体激光器的研究焦点。本文首先总结了近年来国内外高功率、高光束质量边发射激光器研究进展, 梳理了激光器的侧向模式控制以及垂直远场发散角优化方法。其次介绍了脉冲驱动技术, 该技术有助于改善有源区热积累, 获得高峰值功率, 从而实现高亮度输出。多有源区隧道结激光器峰值功率在 100 W 时亮度可达到 $300 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 高亮度垂直宽区边发射 (High-brightness vertical broad-area edge-emitting, HiBBEE) 可减小垂直远场发散角, 进一步提升光学系统耦合效率, 降低准直及聚焦透镜成本。最后, 结合驱动技术和高亮度激光器的发展现状和未来需求, 对实现高性能脉冲驱动高亮度半导体激光器进行了展望。

关键词: 半导体激光器; 高功率; 高光束质量; 高亮度; 脉冲驱动

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250272

CSTR: 32170.14.CJL.20250272

Advances in High-brightness Edge-emitting Semiconductor Lasers and Their Pulsed Driving

GAO Xiang^{1,2}, LIU Xiang^{1,2}, XUE Xiaoe^{1*}, CUI Xiaoning^{1,2}, ZHENG Sirui^{1,2}, SANA Fatima^{1,2},
WANG Lijie³, TONG Cunzhu³, TIAN Sicong^{1*}, BIMBERG Dieter^{1,4*}

(1. Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics & State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, 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;

3. JLight Semiconductor Technology Co., Ltd., Changchun 130031, China;

4. Center of Nanophotonics, Institute of Solid State Physics, Technische Universität Berlin, Berlin D-10623, Germany)

* Corresponding Authors, E-mail: xxe@ciomp.ac.cn; tiansicong@ciomp.ac.cn; bimberg@physik.tu-berlin.de

Abstract: High-brightness edge-emitting semiconductor lasers, with advantages such as high electro-optical conversion efficiency, high beam quality, and high peak power, have been widely applied in various fields, including material processing, medical treatment, and light detection and ranging (LiDAR). However, it remains challenging

收稿日期: 2025-12-07; 修订日期: 2025-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0111200); 国家自然科学基金(62061136010, 61774156, 62174159); 中国科学院青年创新促进会(Y2022067); 中德科学中心合作交流项目(M0386); 吉林省重大科技专项(20240201002GX)

Supported by National Key R&D Program of China (2023YFE0111200); National Natural Science Foundation of China (62061136010, 61774156, 62174159); CAS Youth Innovation Promotion Association (Y2022067); Sino-German Center for Research Promotion (Joint Mobility Program of DFG and NSFC, M0386); Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (20240201002GX)

to achieve edge-emitting lasers with both high output power and high beam quality, and this challenge has become a research focus in the field of high-brightness edge-emitting semiconductor lasers. First, this paper systematically summarizes the research progress of high-power and high-beam-quality edge-emitting semiconductor lasers both domestically and internationally in recent years, outlines the methods for lateral mode control and vertical far-field divergence angle optimization of such lasers. Second, it presents the pulsed driving technology, which helps alleviate thermal accumulation in the active region, achieve high peak power output, and thereby enable high-brightness operation of the device. The brightness of the multi-active-region tunnel junction lasers can reach $300 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ at a peak power of 100 W. The High-brightness vertical broad-area edge-emitting (HiBBEE) laser can reduce the vertical far-field divergence angle, further improving the coupling efficiency of the optical system and lowering the cost of collimating and focusing lenses. Finally, combined with the current development status and future requirements of driving technologies and high-brightness lasers, this paper provides an outlook on the realization of high-performance pulsed-driven high-brightness semiconductor lasers.

Keywords: semiconductor lasers; high-power; high beam quality; high-brightness; pulsed driving

1 引言

边发射半导体激光器(Edge-emitting laser, EEL)具有结构简单、大功率、波长可调谐等特点,目前已成功应用于医疗^[1]、激光雷达^[2]、工业加工等多个领域。随着自动驾驶、精密制造、空间通信等高端领域的快速发展,对激光源性能提出了更严苛的要求。例如,激光雷达需高亮度、低发散角激光源以实现远距离精准探测,工业加工领域要求激光器具备高光束质量以保证加工精度。作为核心激光源之一,边发射半导体激光器凭借其成熟的制备工艺与高功率输出,成为满足上述应用的关键器件,其性能优化对推动相关产业升级具有重要意义。然而,传统边发射半导体具有侧向光束质量差、垂直远场发散角大等缺点。半导体激光器在连续工作时,有源区会产生热量,热积累易诱发侧向多模激射,导致光束质量劣化^[3],进而严重制约其在工业领域的应用^[4]。

传统边发射半导体激光器波导结构对侧向光场约束能力有限,为提升输出功率增大脊波导宽度,导致光场侧向扩展,易激发高阶模式。在垂直远场特性方面,受限于光芯片外延层结构设计,垂直方向光场分布尺寸小,根据衍射理论,光场约束范围与远场发散角呈反比,导致传统边发射半导体激光器垂直远场发散角通常高达 $20^\circ \sim 40^\circ$,造成能量分散、传输效率低下,影响远距离探测与精准加工效果。连续工作模式下有源区热积累会引发载流子分布不均与折射率畸变,进一步诱发侧向多模激射,侧向光束质量因子 M^2 增大,光束聚焦困难,还会导致器件阈值电流升高、斜率效率

下降。

针对边发射半导体激光器的瓶颈问题,目前的器件设计研究主要聚焦于侧向模式控制^[5]和垂直远场发散角优化^[6]两个技术维度,通过新型器件结构设计实现光束质量和输出功率的同步提升。在侧向模式控制方面,有窄脊波导、损耗剪裁微结构波导、宇称-时间(Parity-time, PT)对称、超对称、非均匀波导等结构设计,这类结构主要通过增加高阶模式的光学损耗,抑制高阶模式激射,最终提升侧向光束质量。在垂直发散角优化方面,超大光腔、光子晶体、HiBBEE等结构通过扩大垂直方向光场分布尺寸^[7],进而显著降低光束的垂直远场发散角^[8],同时降低面功率密度,增强器件的稳定性,提高了灾难性光学镜面损伤(Catastrophic optical mirror damage, COMD)的阈值输出功率^[9]。脉冲驱动高亮度激光器具备高光束质量、窄脉宽、高峰值功率特性,在激光雷达等核心应用场景中能够显著提升测量精度与探测距离^[10],展现出显著的应用价值。此外,采用脉冲驱动方法可有效缓解半导体激光器有源区热积累引发的多模激射问题,同时实现高峰值功率输出^[11]。

本文总结了半导体激光器侧向模式控制以及改善垂直远场发散角设计方法研究进展。介绍了半导体激光器脉冲驱动电路技术研究现状,最后展望了未来脉冲驱动高亮度边发射半导体激光器的研究方向。为满足激光雷达应用对激光源提出的高亮度、低发散角、高功率核心需求,本文提供了技术解决方案。

2 高亮度边发射半导体激光器

2.1 边发射半导体激光器光束质量因子与亮度

激光光束质量因子(M^2)描述了实际激光光束与理想高斯光束偏离程度,直接决定激光的聚焦性能、能量分布和传输效率。根据国际标准化组织(International organization for standardization, ISO)的 ISO 11146 标准, M^2 的数学表达式为:

$$M^2 = \frac{\theta \cdot \omega_0 \cdot \pi}{\lambda}, \quad (1)$$

其中 θ 为远场发散半角, ω_0 为束腰半径, λ 为波长。 M^2 大于或等于1,数值越接近1表示光束质量越好。

边发射半导体激光器亮度可以表示为:

$$B = \frac{P}{M_{\text{lateral}}^2 \cdot M_{\text{vertical}}^2 \cdot \lambda^2}, \quad (2)$$

其中 P 为输出功率, M_{lateral}^2 和 M_{vertical}^2 分别为侧向和水平光束质量因子。在相同输出功率下,使用相同光学系统聚焦时,高亮度激光在焦点处光斑更小,能量密度更高。

当前,高亮度边发射半导体激光器的器件设计主要围绕侧向高阶模式控制与垂直远场发散角抑制两个核心维度开展。下文将详细综述近年来针对上述两大关键问题提出的新型器件设计方案。

2.2 高亮度边发射半导体激光器侧向模式控制

2.2.1 窄脊波导结构

传统半导体激光器曾采用增加脊宽的方法扩展有效增益区域,以实现输出功率的提升^[12]。然而,较宽的脊波导结构在较高注入电流条件下易激发高阶侧向模式,导致光束质量劣化,最终限制器件亮度^[13]。相较于传统宽脊波导结构,平板耦合光波导激光器(Slab-coupled optical waveguide laser, SCOWL)(图1)中的窄脊波导设计通过压缩侧向模式空间,有效抑制高阶横模振荡,实现稳定

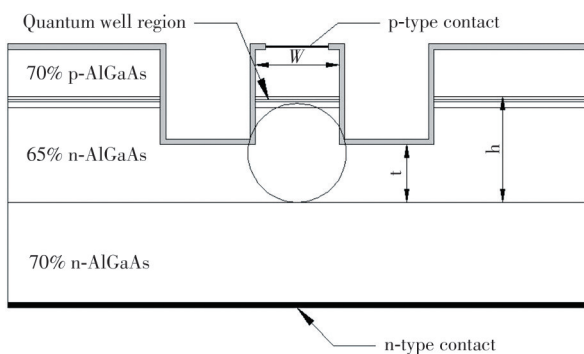


图1 平板耦合光波导激光器^[14]

Fig.1 Slab-coupled optical waveguide laser^[14]

的单侧向模激射,同时保持光场与增益区的高效耦合^[14]。该结构在保证高光束质量的前提下,显著提升侧向光限制因子,降低载流子侧向扩散损耗,为高亮度激光输出提供了有效的解决方案。

2003年,麻省理工学院Huang等^[15]研制出脊宽 $4.6 \mu\text{m}$ 的平板耦合光波导激光器,该器件具有近衍射极限输出特性,远场光斑呈近似圆形,在连续波模式下可实现约1 W的输出功率,侧向光束质量因子 M^2 约为1.1,最大亮度达 $89 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。2007年,该团队为了增大其输出功率,将量子阱数量从3个减至2个以降低阈值电流,同时将包层厚度由 $1.6 \mu\text{m}$ 减薄至 $0.6 \mu\text{m}$ 以抑制串联电阻,优化后器件的功率转换效率从早期设计的35%提升至37%^[16]。新器件的侧向光束质量因子小于1.6,在占空比0.1%、脉宽 $1.2 \mu\text{s}$ 的脉冲条件下,器件峰值功率高达4 W。为进一步解决平板耦合光波导激光器存在的功率转换效率低、斜率效率受限等问题,2022年,Abbasi等^[17]通过采用线性梯度折射率波导层取代传统阶跃折射率结构,结合梯度掺杂技术与非对称势垒设计,有效降低了厚波导层的串联电阻和内部光损耗,将载流子泄漏电流抑制至阈值电流的5%以下,最终实现了高达53%的功率转换效率。

具有窄脊波导结构的激光器虽能有效实现单侧向模式激射,但其脊波导尺寸的缩减显著制约了电流注入效率,导致输出功率受限;同时,窄脊波导截面加剧热积累效应,影响器件可靠性;此外,该结构对刻蚀精度及波导侧壁形貌要求高,工艺难度大,制约规模化制备的可行性。

2.2.2 损耗剪裁微结构

损耗剪裁微结构技术有效解决了传统激光器件中高阶横模抑制不足导致的模式竞争与光束质量退化问题^[18]。该技术通过在波导表面制备亚波长周期结构,利用布拉格散射效应增强基模光场反馈效率,同时增加高阶模式的辐射损耗,其优势在于可实现高精度模式选择性调控,且与标准半导体工艺兼容,能够在维持器件紧凑性的同时显著提升单模输出功率与光束指向稳定性^[19]。

长春光机所佟存柱研究员提出了空间电流调制、梯形槽波导、鱼骨形及锯齿形微结构,有效提升了宽区半导体激光器的光束质量调控精度、输出功率稳定性与发散角控制能力。研究团队通过空间电流调制方法,抑制了边缘载流子累积,显著

降低了远场发散角的注入电流敏感性,使光束参数积提升了36.5%,光谱线宽降低了45%^[20];采用梯形槽结构,使输出功率提升了15.4%^[21];提出鱼骨形微结构,相较于传统器件,该方案在实现侧向发散角降低55%的同时,输出功率提升19%^[22];利用锯齿形微结构,采用选择性损耗调节技术,在不显著降低功率的情况下提高了42%的光束质量^[23];改善了激光器的远场发散角稳定性,将其对注入电流的依赖性降至 $0.13(^{\circ})/A$,输出功率提升了4.8%^[24]。2023年,半导体研究所马晓宇研究员^[25]设计了在脊波导上集成半圆形微结构的高亮

度激光器,相比普通器件,激光器的最大功率提升12%。2024年,半导体研究所牛智川研究员^[26]针对传统宽区器件在高功率工作时因高阶横模激射导致的远场多瓣发散及大角度发散问题,设计了先进锯齿波导结构(Advanced sawtooth waveguide, ASW)(图2(a)、(b))。该结构通过在宽脊波导上周期性引入等腰三角形微结构,利用高阶模式与基模在微结构区域的散射损耗差异,实现了对高阶横模的有效抑制。其侧向远场发散角在饱和电流4.5 A下从 19.61° 降至 11.39° ,改进幅度达42%,且发散角电流依赖性降低38%(图2(c))。

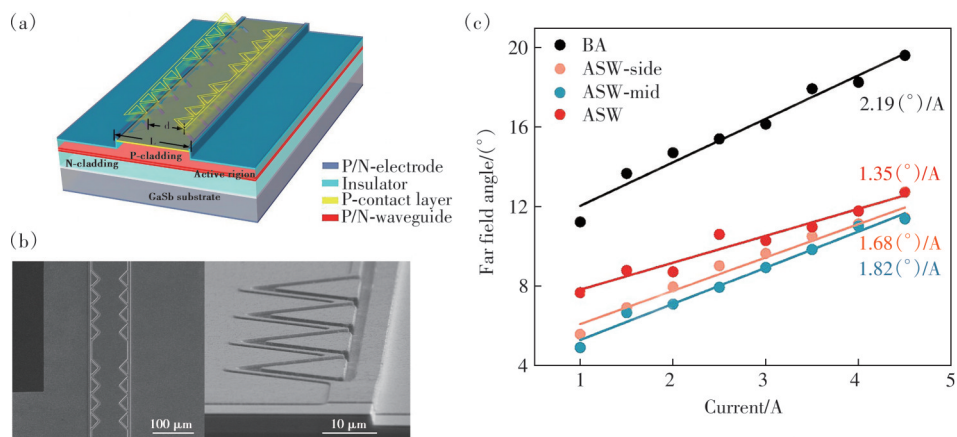


图2 (a)先进锯齿波导激光器;(b)先进锯齿波导激光器的扫描电子显微镜图;(c)侧向远场发散角与注入电流的关系^[26]
Fig.2 (a) ASW laser. (b) Scanning electron microscope image of the ASW laser. (c) The lateral far-field angles exhibit a dependence on the injection current^[26]

损耗剪裁微结构与标准半导体制备工艺具备良好兼容性,无需额外引入复杂设备及特殊工艺流程。该微结构的尺寸精度与形貌均一性直接决定了布拉格散射效应的稳定性,对光刻、刻蚀等加工工艺的精度控制提出了严苛要求,一旦出现工艺偏差,易引发模式控制功能失效。

2.2.3 PT对称和超对称结构

为突破激光器侧向光束质量提升与功率受限之间的技术矛盾,有研究团队通过工艺制程优化与器件结构创新,成功克服了注入电流限制引发的功率约束问题^[27]。除此之外,当前比较热门的研究还探索了将量子物理中的相关概念,如PT对称性^[28]和超对称性(Supersymmetry, SUSY)^[29],引入到激光器结构设计中的可行性。这些量子调控方法通过构建新型光学模式选择机制,为突破传统激光器在光束质量与功率输出间的固有权衡限制提供了全新的物理实现路径。

将PT对称性结构引入激光器的理念最早由美国中佛罗里达大学Miri等^[30]于2012年提出。该结

构由两个耦合的光波导组成,其中,主波导具有更大的横截面积以提供更高的增益,副波导支持基模输出并与主波导的二阶模式具有相同的传播系数。通过这一设计,基模在传播过程中得以放大,而高阶模式则在耦合过程中发生振荡而不获得增益,从而有效抑制了高阶模式输出。2021年,半导体研究所郑婉华院士^[31]设计了一种工作在980 nm波段的PT对称双脊条激光器,通过调节双脊波导结构的耦合常数和镜面损耗,有效解决了传统激光器模式稳定性不足的问题,使PT对称激光器的侧模抑制比达到37 dB。2023年,Şeker等^[32]提出了一种基于准PT对称性设计的单模宽区激光器(图3(a))。该激光器在室温下无需冷却即可实现400 mW的输出功率,侧向光束质量因子 M^2 约为1.25(图3(b))。相比传统的激光器,该准PT对称结构通过优化耦合模式,有效避免了多模振荡,使激光器在较宽的电流范围内实现稳定的单模操作。该研究首次明确展示了准PT对称性在抑制高阶模式和提升激光器输出功率方面的巨大潜力。

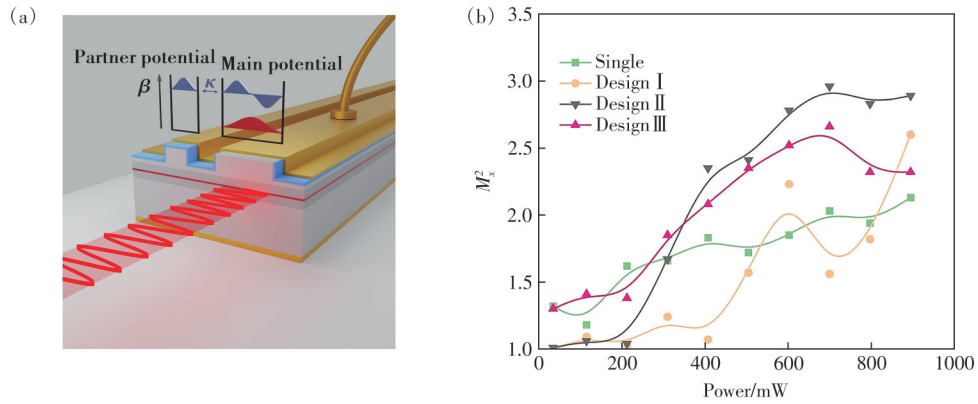


图3 (a)宇称-时间对称激光器;(b)单波导及副波导宽度为 $1.9\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\ \mu\text{m}$ 和 $1.7\ \mu\text{m}$ 三种不同设计 I、II 和 III 的侧向光束质量因子^[32]

Fig.3 (a) Parity-time symmetric laser. (b) Lateral beam quality factor for the single waveguide and the three different designs I, II, and III corresponding to the secondary waveguide width of $1.9\ \mu\text{m}$, $2.1\ \mu\text{m}$, and $1.7\ \mu\text{m}$ ^[32]

2023年,半导体研究所郑婉华院士^[33]设计了一种超对称开沟槽的FP激光器(图4(a)、(b)),其采用 $6.5\ \mu\text{m}$ 宽脊波导作为主增益区提升功率容量,结合两侧的超对称波导实现高阶横模的有效

抑制,并利用周期性结构作为布拉格光栅进行单纵模选择。实验结果表明,该器件在 $800\ \text{mA}$ 电流驱动下实现 $48.5\ \text{dB}$ 的侧模抑制比(图4(c))和 7.8° 的侧向远场发散角(图4(d))。

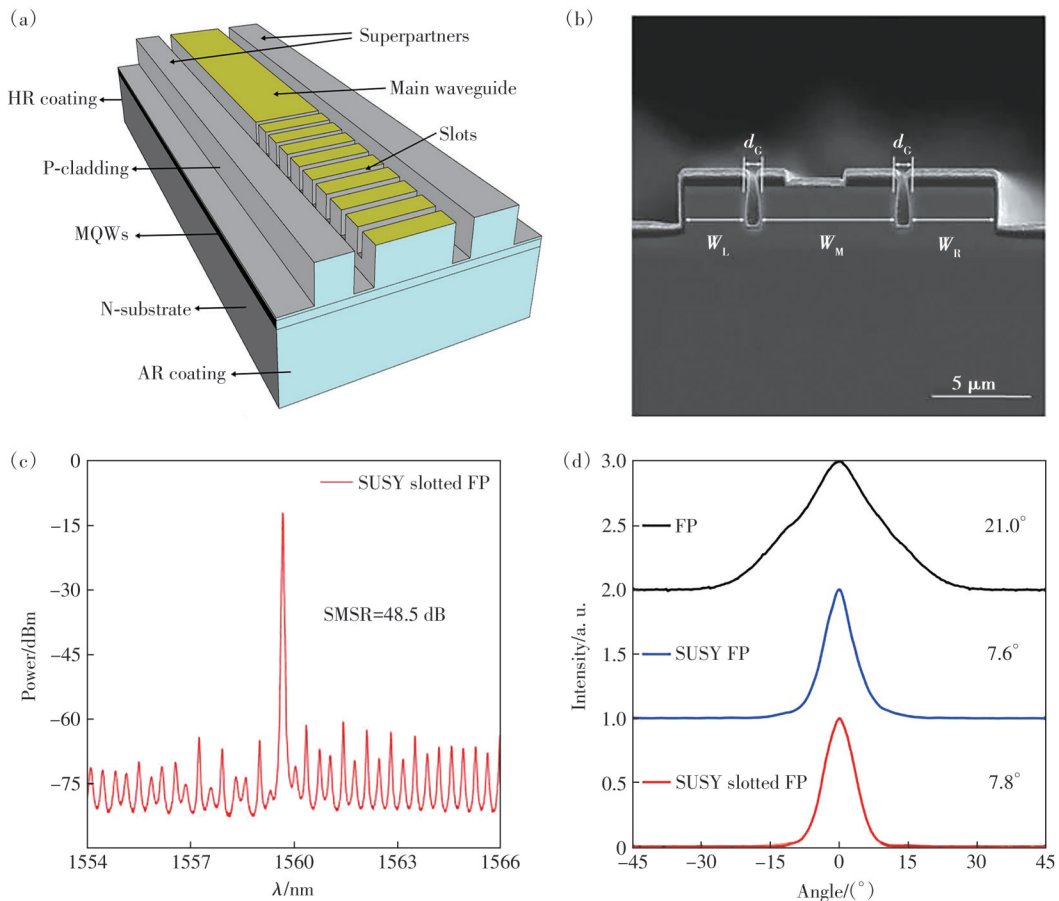


图4 (a)超对称开沟槽激光器;(b)超对称开沟槽激光器的扫描电子显微镜图;(c)注入电流为 $800\ \text{mA}$ 时超对称开沟槽激光器的光谱;(d)注入电流为 $800\ \text{mA}$ 时的侧向远场分布^[33]

Fig.4 (a) SUSY slotted laser. (b) Scanning electron microscope image of the SUSY slotted laser. (c) Spectrum of the SUSY slotted laser at $800\ \text{mA}$ injection current. (d) The lateral far-field profiles at $800\ \text{mA}$ injection current^[33]

2024年, 半导体研究所王宇飞研究员^[34]在超对称主波导与子波导间引入损耗光栅结构。该设计使高阶侧向模式获得额外散射损耗, 将其激发阈值提升至 350 mA 以上, 同时保持基模的低损耗特性。实验结果表明, 改进器件在 350 mA 工作电流下实现了 7.58° 的侧向远场发散角, 较传统 FP 激光器缩减 65%, M^2 优化至 2.181, 提升 37%, 并在 500 mA 时获得 270 mW 准单模输出。该成果为高亮度半导体激光器的发展提供了有效的新型结构设计策略。

不同于传统损耗调控或结构约束方法, PT 对称与超对称的量子调控特性构建模式选择机制能够精准筛选基模并高效抑制高阶横模, 但是其光学特性的实现高度依赖精密的参数匹配, 包括增益与损耗平衡调控、耦合系数精准校准等, 这使得器件的设计难度与制备复杂度高于传统激光器结构。

2.2.4 非均匀波导结构

非均匀波导 (Inhomogeneous waveguide) 的概念由柏林工业大学 Bimberg 院士^[35]于 2012 年首次

提出。该研究证实, 沿脊波导纵向向边界引入波纹结构, 可实现对波导内侧向高阶模式的抑制, 该类波导的宽度通常大于支持单侧向模式激射的传统波导。该抑制效应的本质是, 侧向高阶模式的散射损耗高于基模。因此, 即便采用宽波导结构, 器件也可实现单模输出, 在侧向输出高光束质量、窄发散角的光束。同时, 宽波导结构的器件具有更高的输出功率, 相较于无波纹的直波导激光器, 非均匀波导激光器可实现更高的亮度。2018 年, Bimberg 院士^[36]设计了一种非均匀波导激光器, 其在 15 μm 宽的脊波导两侧刻蚀三角形波纹, 可实现对高阶侧向模式的抑制。与参考激光器相比, 该带波纹结构的器件光束质量得到显著改善, 亮度提升至参考器件的两倍。2024 年, 长春光机所 Bimberg 院士^[37]在 15 μm 宽的脊波导两侧刻蚀有不同尺寸的正方形与三角形波纹 (图 5(a)), 这类波纹能够有效抑制激光器的高阶侧向模式。5 μm 正方形波纹激光器产生的亮度最高, 在 1 A 时侧向光束质量因子 M^2 为 3 (图 5(b)), 亮度达到 23 $\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, 比参考激光器高出 35% (图 5(c))。

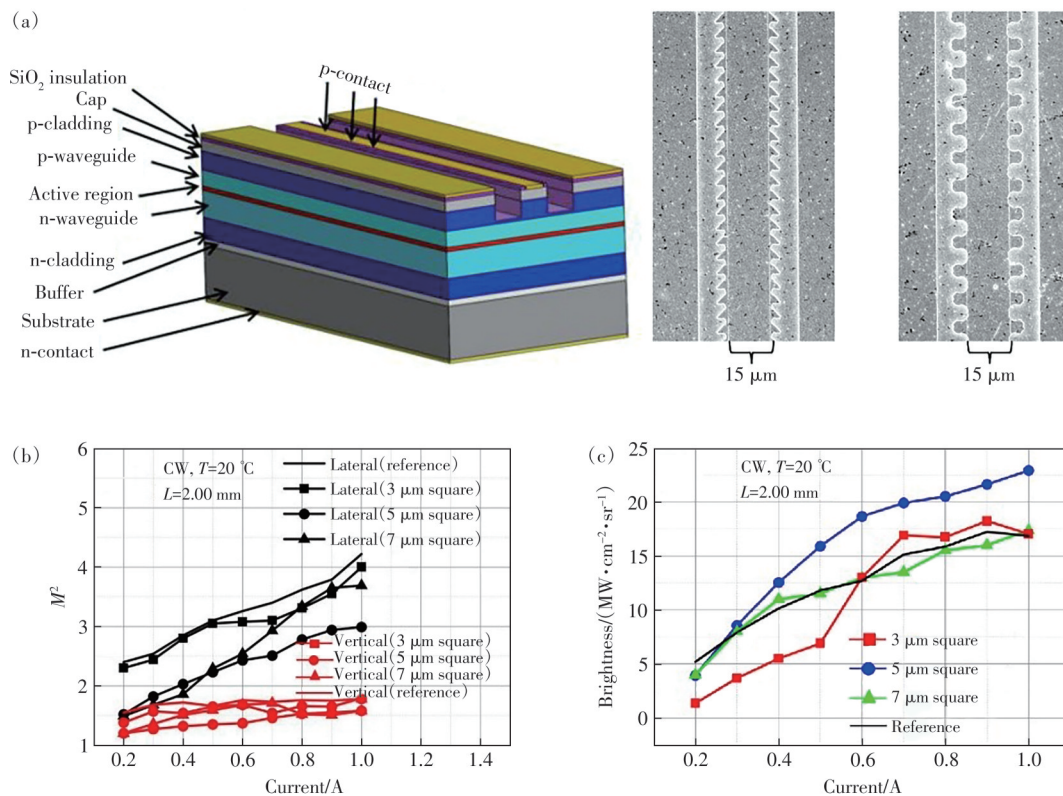


图 5 (a)非均匀波导激光器;(b)侧向和垂直光束质量因子;(c)方向波纹激光器的亮度^[37]

Fig.5 (a)Inhomogeneous waveguide laser. (b)Lateral and vertical beam quality factor. (c)Brightness of the square corrugated lasers^[37]

相较于 PT 对称、超对称结构,非均匀波导结构具有加工工艺简单的优势,且相较于窄脊结构,其具备更高的光功率输出能力,具有重要的研究价值与良好的应用潜力。

表 1 总结了连续驱动高亮度边发射半导体激光器侧向模式控制研究进展。窄脊波导激光器通过缩减脊宽抑制高阶模式激射,但受限于增益面积较小,输出功率偏低;虽可通过延长腔长提升输

输出功率,却会导致器件体积增大,不利于小型化集成封装。宽区微结构激光器输出功率较高,但侧向模式控制效果有待提升。PT 对称与超对称结构虽能实现精准模式调控,但其主波导宽度较窄,导致输出功率受限。非均匀波导的光束质量介于窄脊波导与宽区微结构激光器之间,在输出功率与光束质量间实现了良好平衡,具备较大的未来发展潜力。

表 1 连续驱动高亮度边发射半导体激光器侧向模式控制研究进展

Tab. 1 Advances in lateral mode control of continuous-wave-driven high-brightness edge-emitting semiconductor lasers

器件结构	年份	器件尺寸(腔长 L 、脊宽 W)	电流/A	侧向光束质量因子 M^2	功率/W	亮度/(MW·cm ⁻² ·sr ⁻¹)	参考文献
窄脊	2003	$L=10\text{ mm}, W=4.6\text{ }\mu\text{m}$	1	1.1	1	89	[15]
窄脊	2007	$L=10\text{ mm}, W=5.7\text{ }\mu\text{m}$	4	1.6	2.8	114	[16]
微结构	2016	$L=1.24\text{ mm}, W=64\text{ }\mu\text{m}$	2.5	10.9	2.2	19	[20]
微结构	2021	$L=1.5\text{ mm}, W=100\text{ }\mu\text{m}$	4	13.4	3.6	28	[23]
PT 对称	2023	$L=4\text{ mm}, W=7.5\text{ }\mu\text{m}$	0.5	1.25	0.4	30	[32]
超对称	2024	$L=1\text{ mm}, W=5.65\text{ }\mu\text{m}$	0.35	2.181	0.2	13	[34]
非均匀波导	2018	$L=2\text{ mm}, W=15\text{ }\mu\text{m}$	1	2.3	0.8	17	[36]
非均匀波导	2024	$L=2\text{ mm}, W=15\text{ }\mu\text{m}$	1	3	0.9	23	[37]

2.3 高亮度边发射半导体激光器垂直远场优化

为提升光学系统的耦合效率、降低准直透镜、聚焦透镜使用成本,除侧向模式控制外,还可通过优化器件外延层的结构设计,降低激光器的垂直远场发散角。

2.3.1 超大光腔

研究人员在半导体激光器中引入超大光腔

(Super large optical cavity, SLOC)^[38]结构(图 6),旨在克服传统波导结构因光场限制过强导致的光束质量劣化、亮度受限及高功率下灾难性光学镜面损伤等问题。该结构通过扩大垂直方向光场分布尺寸,降低功率密度并抑制高阶横模激射,从而显著降低光束垂直远场发散角,同时增强了器件的热管理和功率承载能力。

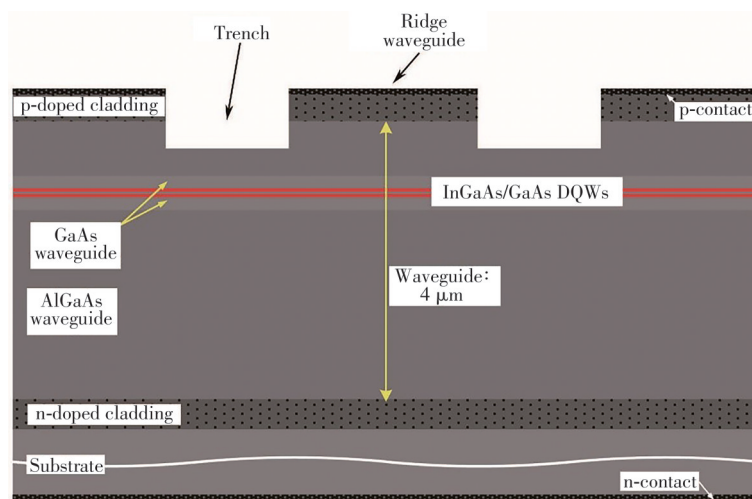


图 6 超大光腔示意图^[38]

Fig. 6 Schematic drawing of super large optical cavity^[38]

2008 年,FBH 的 Wenzel 等^[39]将 InGaAs-GaAsP 双量子阱嵌入 4.8 μm 厚的超大光学腔中,并通过在波导两侧刻蚀 5 μm 和 20 μm 宽的沟槽,有效增加高阶模式的损耗。实验结果显示,该激光器在输出功率 1.5 W 下实现了优异的光束质量,光束质量

因子 M^2 为 1.3,垂直发散角为 15° ,侧向发散角在 $7.3^\circ\sim 9.2^\circ$ 之间。为了进一步减小发散角,2012 年,该团队使用厚度为 8.6 μm 的 AlGaAs 波导结构实现了更宽的垂直模式扩展^[40]。实验表明,该激光器在连续波操作下实现了 1.3 W 的无畸变光学输出

功率,其输出光束的垂直发散角为 9° ,侧向发散角为 6° ,光束质量因子 M^2 为1.1,最大亮度达到 $90 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。2018年,半导体研究所郑婉华院士^[41]设计了一种基于厚度为 $5.2 \mu\text{m}$ 的不对称超大光学腔的高功率、高亮度 980 nm 激光器。在 2 A 连续波工作电流下产生 1.9 W 的单模输出,在半高全宽处具有 6.8° 侧向和 11.5° 的垂直远场发散角,相应的侧向和垂直方向光束质量因子 M^2 分别为1.77和1.47,亮度为 $76.8 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。

通过扩大垂直方向光场分布范围,可显著降低光束垂直远场发散角。然而,若光腔尺寸过度扩大,易引发垂直方向光场约束能力弱化,进而导致基模稳定性下降,因此需平衡光腔尺寸与光场约束之间的关系。

2.3.2 光子晶体

边发射半导体激光器中的光子晶体(Photonic band crystal, PBC)结构是由周期性交替排列的高、低折射率介质层形成。PBC激光器能带计算结果表明^[42],其工作原理与折射率导引型PBC光纤相似^[43],通过光子带隙效应在垂直方向实现光

场约束与模式调控^[44]。该结构通过设计带隙位置与宽度,可在抑制高阶横模激射的同时增强基模的光场限制能力,从而有效降低垂直发散角并提升光束质量^[45];此外,PBC的周期性折射率调制可优化载流子注入与光场分布的侧向重叠效率,增强单模稳定性并降低内部光学损耗,最终实现高亮度、低垂直发散角且具有优异模式选择性的激光输出。

双边PBC激光器具有有源区两侧对称分布的PBC结构(图7(a)),这类激光器的腔层厚度较大,具有大的模式扩展,可以显著减小垂直远场发散角,有效抑制灾变性光学镜面损伤的发生^[46]。单边PBC激光器的PBC结构一般设计于n型波导区域,p型波导的尺寸相对较薄。这种非对称垂直波导设计可以将光场向n型波导偏移,减小p型掺杂材料的自由载流子吸收损耗。此外,在相同掺杂浓度下,p型半导体相比n型半导体具有高电阻率和低导热率,因此单边PBC结构可有效降低器件的电阻和热阻,使激光器具有高功率转换效率。

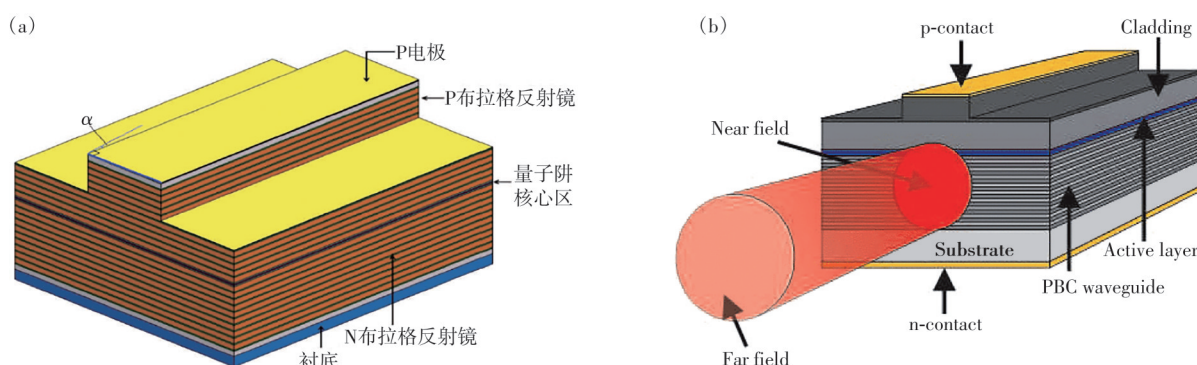


图7 (a)双边光子晶体激光器示意图^[46]; (b)单边光子晶体激光器示意图^[48]

Fig.7 (a)Schematic drawing of a two-sided PBC laser^[46]. (b)Schematic drawing of a one-sided PBC laser^[48]

2014年,柏林工业大学Bimberg院士^[47]设计了单边PBC高亮度边发射半导体激光器(图7(b)),实现了连续波下最大功率为 1.9 W 的单横模输出,具有 9° 侧向和 14° 垂直远场发散角,近似圆形光斑输出,且光束质量因子 M^2 小于1.9,最大亮度为 $72 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$;之后,为了保持在高温工作下激光器光束输出的稳定性,其改变了不同外延层的掺杂情况,使得激光器在高达 80°C 的温度下仍能输出 1.3 W 的输出功率,同时侧向和垂直 M^2 小于1.9^[48];为了研究不同对数PBC结构的激光器输出特性,其针对15、9和6对层数的激光器分别进行了差异化设计:15对层结构聚焦于高功率连续

输出,9对层结构优化了高峰值脉冲性能,而6对层结构则在降低电阻与保持光束质量之间实现了平衡^[49]。

2014年,半导体研究所郑婉华院士^[50]制备出外延结构优化的单边PBC激光器,该器件在 2 A 电流下的垂直远场发散角为 10.5° ,较传统激光器降低 31.2° 。2016年,该团队制备的锥型光子晶体激光器在 2.5 A 电流下垂直发散角为 15.5° ^[51]。2021年,该团队将量子阱有源区向p型波导偏移,减少光场与有源区的重叠部分,有效降低腔面光功率密度,还将器件垂直发散角降低至 14.2° ^[52]。2023年,该团队设计了横向光子晶体(Transverse

photonic crystal, TPC) 结构, 采用传输矩阵法和有效折射率法完成结构参数优化, 使高阶模式传播常数处于光子晶体的允带内, 显著增加高阶模式光学损耗, 比参考器件发散角降低近一倍^[53]。2025年, 该团队对 PBC 激光器散热封装结构进行优化, 散热器体积减少了 83.3%, 使用金刚石材料散热器, 使器件散热效率提高 20.6%^[54]。

2.3.3 HiBBEE

与 PBC 结构类似, HiBBEE 也具有高、低折射率介质层的垂直波导, 以减少发射面的负载并实现小的垂直远场发散角^[55]。不同的是, HiBBEE 激光器与 PBC 激光器中使用的周期性层序列不同, 其采用了非周期性层序列, 并且其波导厚度较 PBC 激光器显著减小。尽管如此, HiBBEE 激光器仍保留了 PBC 激光器的所有优势特征, 且在某些情况下性能表现更为优异。较薄的垂直层结构简化了外延生长过程, 降低了晶圆弯曲的风险, 还显著降低器件的电阻和热阻, 提升了激光器的整体性能和稳定性。

2016年, 柏林工业大学 Bimberg 院士^[56]设计了

具有 8 μm 脊宽的高亮度 HiBBEE 激光器, 该激光器可在 1 060 nm 波长范围内产生创纪录的 2.2 W 单横模功率, 并且实现近似圆形的输出光束。2024年, 长春光机所 Bimberg 院士^[37]针对 HiBBEE 激光器进行了波导设计优化, 在脊波导两侧引入了方形波纹非均匀波导结构。实验结果表明, 具有非均匀波导的 HiBBEE 激光器的光束质量因子 M^2 值相比参考器件显著降低, 光束质量得到了极大改善, 1.5 A 电流下实现了 $14 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的亮度, 较传统波导结构的激光器提升了两倍。同年, 进一步探索了不同形状的非均匀波导(如正方形、三角形、鱼骨形)与 HiBBEE 结构(图 8(a)) 结合来提高激光器的亮度^[57]。其中, 方形非均匀波导 HiBBEE 激光器垂直远场发散角最小, 8.6° (图 8(b)), 在 2 A 电流时的光束质量因子 M^2 为 2.5(图 8(c)), 其亮度被提高到 $29.4 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 比普通结构的激光器高 73%(图 8(d))。这一研究是目前已知性能最优的 1 060 nm HiBBEE 结构激光器, 展示了非均匀波导与 HiBBEE 结构结合的激光器在高亮度、高功率应用中的巨大潜力。

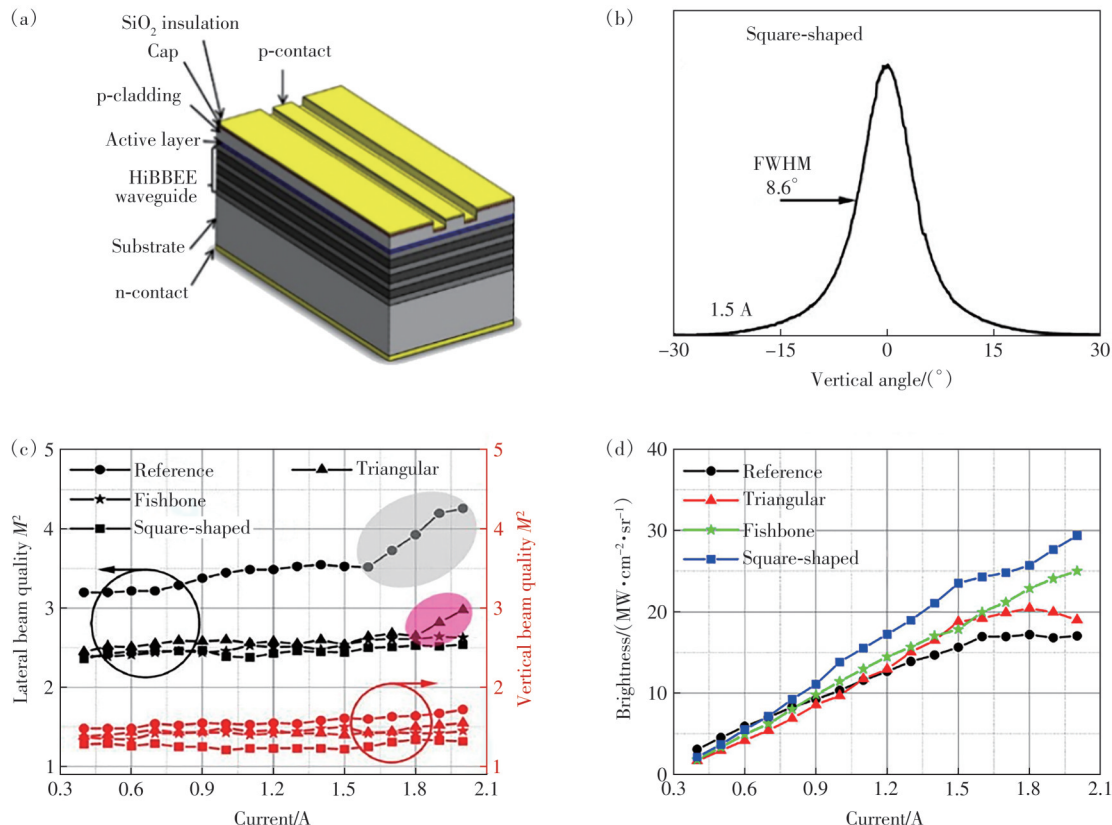


图 8 (a) HiBBEE 激光器示意图; (b) 垂直远场分布; (c) 垂直和侧向光束质量因子; (d) 亮度^[57]

Fig.8 (a) Schematic drawing of the HiBBEE laser. (b) Far-field distributions in the vertical direction. (c) Vertical and lateral beam quality factors. (d) Brightness^[57]

表2总结了高亮度边发射半导体激光器垂直远场优化研究进展。超大光腔结构通过增大光腔尺寸扩展光场分布,降低光场衍射效应,其垂直远场发散角可低于 10° ;PBC结构通过减小光腔厚

度,有效降低器件电阻和热阻,具有高功率转换效率。从远场发散角的综合优化效果来看,HiBBEE激光器侧向与垂直发散角最低为 $5.1^\circ \times 8.6^\circ$,可实现近似圆形光斑。

表2 高亮度边发射半导体激光器垂直远场优化研究进展

Tab. 2 Advances in lateral mode control of high-brightness edge-emitting semiconductor lasers

器件结构	年份	器件尺寸(腔长 L 、脊宽 W)	远场发散角 $\theta_{lat} \times \theta_{ver}$ (FWHM)	电流/A	功率/W	参考文献
超大光腔	2008	$L=3.9\text{ mm}, W=5\ \mu\text{m}$	$9.2^\circ \times 15.8^\circ$	2.1	1.5	[39]
超大光腔	2012	$L=6\text{ mm}, W=7\ \mu\text{m}$	$6.5^\circ \times 9^\circ$	2.56	1.3	[40]
超大光腔	2018	$L=3\text{ mm}, W=7\ \mu\text{m}$	$6.8^\circ \times 11.5^\circ$	2	1.9	[41]
双边PBC	2017	$L=1.7\text{ mm}, W=84\ \mu\text{m}$	$-\times 16.5^\circ (\theta_{95\%})$	2.5	2	[21]
单边PBC	2014	$L=2.64\text{ mm}, W=9\ \mu\text{m}$	$9^\circ \times 14^\circ$	2.6	1.9	[47]
单边PBC	2014	$L=1.3\text{ mm}, W=200\ \mu\text{m}$	$5.7^\circ \times 10.5^\circ$	2	1	[50]
单边PBC	2015	$L=2.64\text{ mm}, W=6\ \mu\text{m}$	$11^\circ \times 14.7^\circ$	2.8	1.7	[48]
单边PBC	2016	$L=2\text{ mm}, W=4\ \mu\text{m}$	$3.6^\circ \times 15.5^\circ$	2.5	1.7	[51]
单边PBC	2021	$L=4\text{ mm}, W=100\ \mu\text{m}$	$-\times 15.6^\circ$	20	17.5	[52]
单边PBC	2025	$L=4\text{ mm}, W=350\ \mu\text{m}$	$15.5^\circ \times 18.2^\circ$	60	54.5	[54]
HiBBEE	2016	$L=5\text{ mm}, W=8\ \mu\text{m}$	$9^\circ \times 10.3^\circ$	3.5	2.2	[56]
HiBBEE	2024	$L=2\text{ mm}, W=15\ \mu\text{m}$	$5.1^\circ \times 8.6^\circ$	1.5	0.8	[57]

3 用于半导体激光器的脉冲驱动技术

为了实现激光器的高亮度输出,除了提高激光器的光束质量,提高激光器的输出功率尤为重要。然而,器件在工作时,电流通过有源区会产生焦耳热,若散热不足,热量很容易在器件内部积累。发射端面材料受热膨胀会导致激光器腔面曲率变化,进一步改变光场分布,严重时可能引发灾难性光学镜面损伤,从而限制了输出功率的进一步提升。通过脉冲驱动可以有效解决半导体激光器在工作时有源区热积累的问题,提高激光器的峰值输出功率,从而实现激光器的高亮度输出。

3.1 激光器脉冲实现方法

当前,窄脉冲激光的产生技术主要有调 Q 技术(Q -switching)、锁模技术(Mode-locking)及增益开关技术(Gain-switching)。调 Q 技术^[58]通过快速

改变激光谐振腔的损耗实现脉冲激射。先将损耗调高,让增益介质储存大量粒子数;再瞬间将损耗值调低,使储存的能量以极短脉冲形式快速释放。锁模技术^[59]通过主动或被动方式,将激光谐振腔内不同频率的纵模锁定在同一相位,使多个纵模干涉叠加,形成超短脉冲。增益开关技术^[60]利用泵浦源(如电流、光源)快速调制激光增益介质的增益,快速建立激射条件后迅速关闭,从而产生短脉冲。这三种方法所生成的激光脉冲,在输出功率、重复频率、调制脉宽等关键特性上存在差异,如表3所示。其中,半导体激光器的增益开关技术属于直接调制技术的一种,通过向激光器注入脉冲电流即可驱动其产生脉冲激光。该技术的原理与结构均较为简单,设置方式灵活、运行性能稳定,其脉冲宽度和重复频率还可实现连续调节,目前该技术已被广泛应用于半导体激光器的脉冲驱动场景^[61]。

表3 三种脉冲激光技术对比

Tab. 3 Comparison of three types of pulsed laser technologies

对比参数	调 Q (Q -switching)	锁模(Mode-locking)	增益开关(Gain-switching)
调制脉宽	ns~ps级	ps~fs级	μs ~ns级
调制频率	kHz~MHz级	MHz~GHz级	Hz~MHz级
实现方式	周期性改变谐振腔 Q 值	多纵模实现固定相位关系	脉冲电流直接驱动
应用场景	生物医疗、工业加工	生物医疗、工业加工	激光雷达、光通讯
系统复杂度	高	高	低
适用激光器	固体激光器	固体激光器、光纤激光器、半导体激光器	半导体激光器

3.2 基于增益开关的半导体激光器脉冲技术

增益开关技术通过直接调制外部电激励信号

的脉冲幅值、脉冲宽度及重复频率等参数,可精确控制激光器输出光脉冲的特性^[60]。采用高频电脉

冲信号直接调制半导体激光器时,在脉冲电流的上升阶段表现出如下特性:当电流未超过激光器阈值电流时,激光器只产生自发辐射;当电流突破阈值后,激光腔内载流子浓度快速积累,大量载流子复合并产生光子,光子浓度随之迅速升高,经谐振腔谐振后实现受激辐射。光子浓度的升高会反过来导致载流子浓度快速下降,而载流子浓度的降低又进一步使光子浓度迅速衰减。随后,脉冲电流降至零,激光器停止激光;激光器会依据调制电流的重复频率与脉冲宽度重复上述过程,持续产生激光脉冲,这就是增益开关半导体激光器的工作原理。因此,施加于激光器的脉冲电流参数(上升时间、下降时间、脉冲宽度及重复频率)会直接影响半导体激光器输出光脉冲的特性。

在基于增益开关技术的脉冲产生电路中,场效应晶体管作为电路中的核心开关元件,负责脉冲电流的通断控制。其性能差异会直接影响激光脉冲的宽度、输出稳定性及驱动电路的工作效率。当前,常用的场效应晶体管主要包括 MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor) 与 GaN FET 两类。

3.2.1 MOSFET 开关型脉冲驱动电路

在短脉冲驱动电路中, MOSFET 以其工作电压高、峰值电流大、技术成熟等优点被广泛应用于高速开关中。

在大功率脉冲电路研究方面,2011年,上海光机所侯霞研究员^[62]采用 MOSFET 作开关的驱动电路频率可达 50 kHz、脉宽最窄 4.6 ns、输出电流可达 72.2 A。2014年,北京大学陈彦超等^[63]采用雪崩晶体管驱动 MOSFET 开关来达到更快的上升沿,在 195 V 电压下输出 124 A、脉宽最低 8.6 ns 的电脉冲。2022年,天津大学赵毅强教授^[64]针对储能电感优化,利用储能电感元件的特性设计升压电路实现低损耗驱动电路(图 9),结合开关损耗模型分析 MOSFET 开关功耗随漏极电流与导通时间的变化规律。结果表明,当开关漏极电流与导通时间增大时,开关损耗会显著增加。该驱动电路在 10 kHz 频率下,电脉冲宽度为 3.8 ns,上升下降时间分别为 3.5 ns 和 3.7 ns,能够在 132 A 电流下实现稳定运行。

在高频脉冲驱动电路研究方面,2018年,山东大学程文雅教授^[65]用可编程逻辑器件作为电路控制核心,搭配 200 MHz 外部振荡器作为时钟输

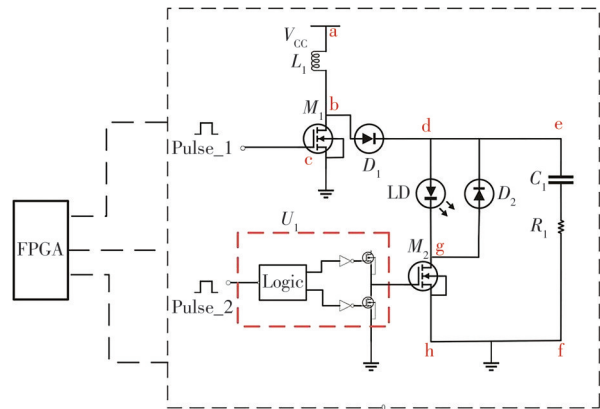


图 9 脉冲驱动电路原理结构^[64]

Fig.9 Principle structure of pulsed driving circuit^[64]

入;通过时钟分频技术将 200 MHz 时钟降至系统所需频率,可在保证 100 MHz 频率的同时,实现脉冲宽度(538 ps~10 ns)连续可调的脉冲种子源。2025年,中国澳门大学毛翔宇研究员^[66]采用双脉冲重叠(Double pulse overlapping, DPO)架构,通过堆叠两个功率晶体管,利用二者导通重叠时间直接定义激光电流脉宽,消除传统预驱动器的局限性,实现了 100 ps 的脉冲驱动器,最大输出频率达 30 MHz。

3.2.2 GaN 开关型脉冲驱动电路

GaN 材料与 Si 材料相比,具有更高的禁带宽度、电子饱和速度、临界击穿电场等。采用 GaN FET 作为脉冲电路的开关元件可以实现更快的开关速度和更短的脉冲上升和下降时间。FBH^[67]利用 GaN HEMT 作为开关管,实现上升时间和下降时间低于 0.5 ns、100 MHz 频率的激光器脉冲驱动电路,输出电流超过 20 A;2016年,通过低寄生封装方案解决高电流与窄脉宽共存时的寄生干扰问题,在 580 ps 下能输出 30 A 电流,重复频率最高达 5 MHz^[68]。2020年,新型基于 GaN FET 的高速驱动器实现了高达 1 000 A 的电流脉冲和 10 kHz 的重复频率,将 48 个单管组成的 bar 条集成封装以最小化寄生电感,最终输出峰值功率超过 600 W 的稳定光脉冲。由于沿 bar 条阵列注入的电流分布是不均匀的,其中单管的效率及其输出功率随电流的变化也有所不同^[69]。目前,车载激光雷达普遍使用的是这种多点激射的线扫描激光阵列,成熟应用的有 64 线、128 线激光雷达。激光雷达的线数越高,代表激光器的数量越多,其能捕捉到的物体细节越丰富,扫描图案能够提供更丰富的三维信息,最终实现更安全的辅助驾驶功能。

国内基于 GaN 开关的脉冲驱动电路研究相

对较晚,得益于新能源汽车的激光雷达辅助驾驶技术发展,近年来也取得了很多成就。2022年,半导体研究所张旭^[70]设计了用于窄脉冲和高电流

激光雷达应用的 GaN-Si 混合集成驱动器(图 10),驱动器输出脉宽为 12.6 ns,能够在 10 MHz 的频率下运行。

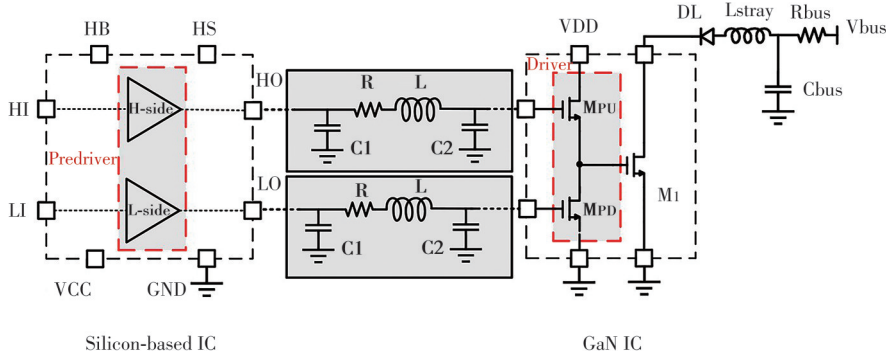


图 10 氮化镓集成电路与高性能硅基集成电路的混合集成驱动器^[70]

Fig.10 Heterogeneous integration driver of GaN integrated circuit and high-performance silicon-based IC^[70]

2022年,电子科技大学明鑫教授^[71]提出利用自循环斜率增强型 3X 电荷泵的全集成 GaN 激光驱动器,该驱动器能够产生峰值电流为 10 A、脉冲宽度为 2 ns 的电流脉冲,在工作频率 20 MHz 时,开关元件的导通延迟和关断延迟为 1.98 ns 和 953 ps,电脉冲的上升和下降时间为 435 ps 和 259 ps。2025年,中国台湾阳明交通大学刘清耀等^[72]提出了一种高功率效率脉冲激光驱动器,该激光驱动

器实现了 10 A 的峰值电流,脉冲持续时间为 10 ns,频率为 20 MHz,实现 75% 的峰值效率。

相关脉冲驱动电路的性能指标总结于表 4 中。GaN 器件开关响应速度快,脉冲上升与下降时间可达亚纳秒级,且体积紧凑,适用于激光雷达等精密应用;MOSFET 器件工作电压范围宽、峰值输出电流大,技术成熟度高,适配多功率等级应用。

表 4 基于开关元件的脉冲驱动电路性能指标汇总

Tab. 4 Summary of performance indicators for switch-element-based pulsed-driven circuits

开关元件类型	年份	脉冲宽度/ns	重复频率/Hz	上升/下降时间/ns	峰值电流/A	参考文献
MOSFET	2011	4.6	50k	2.2/—	72.2	[62]
MOSFET	2014	8.6	—	4.5/13.6	124	[63]
MOSFET	2018	0.538	100M	<1	3	[65]
MOSFET	2022	3.8	10k	3.5/3.7	132	[64]
MOSFET	2025	0.1	30M	—	15	[66]
GaN	2010	2	100M	<0.5	20	[67]
GaN	2016	0.58	5M	—	30	[68]
GaN	2022	12.6	10M	—	8.25	[70]
GaN	2022	2	20M	0.435/0.259	10	[71]
GaN	2025	10	20M	—	10	[72]

4 脉冲驱动高亮度边发射半导体激光器

4.1 脉冲驱动方式对半导体激光器散热的影响

脉冲驱动作为提升边发射半导体激光器峰值功率的核心技术,其驱动参数直接决定有源区的热生成速率与热积累特性。

脉冲占空比(脉冲宽度与重复周期的比值)是调控单位时间内有源区热产生速率与热积累效应的核心参数。低占空比(<1%)下,脉冲间歇期较长,有源区产生的瞬时热量可通过热扩散充分消

散,器件工作温度接近室温,从而实现高功率稳定输出^[73];高占空比(>10%)下,热累积呈显著叠加效应,器件温度持续攀升,易诱发有源区载流子溢出,还会导致材料折射率畸变,最终造成光束质量劣化^[74]。

4.2 高频脉冲驱动电路与激光器间的寄生效应与阻抗匹配

在高频脉冲驱动电路与半导体激光器的交互配合中,除了考虑脉冲电流的脉宽、频率、输出功率等基本性能指标要符合所驱动激光器的实际应用需求外,寄生效应与阻抗匹配更是决定脉冲信

号完整性、激光输出稳定性及系统效率的核心问题。下文将讨论脉冲驱动电路与激光器的寄生效应和阻抗匹配,并介绍脉冲驱动高亮度边发射半导体激光器的研究进展。

4.2.1 寄生效应

驱动电路在高频脉冲传输中,寄生效应主要源于布线与元器件封装。电路布线会形成寄生电感,其值随布线长度增加而增大;同时,开关器件及驱动芯片的封装寄生电感与电容会叠加至回路中,加剧信号振荡与能量损耗,阻碍高频信号传输,降低开关速度。激光器芯片与封装引脚间的键合线长度、直径会引入电感,影响高频匹配。针对此类问题,可通过集成化封装^[66]的方式将激光器与驱动电路集成在同一封装内,缩短信号传输路径,减少额外寄生。

4.2.2 阻抗匹配

阻抗是由于电路中电阻、电感和电容的存在而产生的各个阻碍的矢量和。阻抗匹配指通过调整输入阻抗和输出阻抗来使得电子器件满足一定条件,通常该条件是使得系统传输功率最大或者使得信号反射最小。在高频脉冲驱动电路中,阻抗匹配的核心目标是消除高频脉冲传输中的信号反射,实现驱动电路与激光器间的高效功率传输,否则将引起脉冲信号出现反射、过冲和振铃等问题^[75]。在高频电路中通常以 $50\ \Omega$ 作为标准阻抗。激光器在高频工作状态下呈现复数阻抗特性,其阻抗的实部为电阻分量,虚部为电抗分量。通过矢量网络分析仪可测量激光器在目标频率下的等效阻抗,从而明确其电阻分量与电抗分量的具体数值;随后需设计匹配网络,通过并联小电容的方式抵消其电抗^[76]。最终需将电阻分量匹配至 $50\ \Omega$,常用方法包括采用串联或并联电阻。

为降低阻抗失配与寄生电感对器件性能的影响,2025年,中国澳门大学毛翔宇研究员^[66]通过优化电路元件布局缩短电流环路长度,降低总串联电阻;采用蛇形布线保证路径等长,减少信号传输延迟,提升阻抗一致性。为减少印刷电路板(Printed circuit board, PCB)电流路径上的寄生电感,提出 diode-on-chip 和 diode-on-interposer 方案,前者将激光器直接封装于脉冲驱动芯片上,消除 PCB 寄生电感,但残留键合线寄生电感;后者将激光器粘贴于中介层,芯片倒装于激光器与中介层之上形成最短电流环路,消除键合线与 PCB 寄生

电感。其中,diode-on-interposer 方案寄生电感降至 $0.067\ \text{nH}$,较传统 diode-on-PCB 方案($0.75\ \text{nH}$)降低 91%。

4.3 脉冲驱动高亮度边发射半导体激光器

对于不同结构的高亮度、高功率激光器,脉冲驱动可显著提高器件的峰值输出功率和光束质量,同时有效抑制了热积累效应对器件性能的劣化作用。

2007年,麻省理工学院 Huang 等^[16]在 0.1% 的占空比和 $1.2\ \mu\text{s}$ 脉宽的脉冲工作条件下脉冲驱动平板耦合光波导激光器,获得超过 4 W 的峰值功率,器件的光束质量因子 M^2 小于 1.6。2016年,柏林工业大学 Bimberg 院士^[77]通过 PBC 激光器和 GaN 驱动器实现了高亮度皮秒脉冲,在 80 MHz 下,脉冲宽度为 800 ps 的电脉冲在 2.5 A 时,产生的光脉冲峰值功率超过 4 W,脉宽为 37 ps,且不会引起腔面损伤。该偏置电流下的光束质量因子 M^2 在侧向和垂直方向分别为 1.55 和 1.74,亮度为 $130\ \text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。2018年,FBH 的 Knigge 等^[78]设计了一种适用于汽车探测与测距系统的宽区高亮度激光器。在电脉冲宽度为 10 ns、重复频率为 10 kHz 时,激光器在峰值电流达到 100 A 的情况下,表现出良好的性能。对于 $50\ \mu\text{m}$ 脊宽的激光器,其侧向光束质量 M^2 约为 9,远场发散角为 7.4° ,脉冲功率高达 34 W。此外,在 $100\ \mu\text{m}$ 脊宽的设计下,峰值功率可高达 50 W。2021年,该团队通过频率为 10 kHz 的高速电流驱动器驱动高亮度主振荡功率放大器激光器产生 3.3 ns 脉冲激光输出,峰值功率达 18 W^[79]。2023年,该团队研发一种纳秒脉冲驱动器,其脉宽可在 2~5 ns 连续调节并以 10 kHz 频率提供 10 A 的脉冲电流;另外,针对纳秒脉冲驱动优化了主振荡功率放大器激光器侧向模式约束设计,相比普通器件,优化后的激光器具有好的侧向光束质量因子 M^2 约为 3.6^[80]。2024年,北京理工大学李林教授^[81]提出一种基于等效电路模型分析的脉冲半导体激光器性能提升方法,其对激光器腔长、有源区宽度、腔面反射率等结构参数在脉冲驱动电路下的瞬态特性进行仿真分析,据此制备有源区宽度 $90\ \mu\text{m}$ 、腔长 2 mm 的激光器芯片。在峰值电流 29.3 A、脉宽 31 ns 的驱动条件下,激光器输出峰值功率达 19.4 W,光脉宽为 37 ns。

2025年,FBH 的 Ammouri 等^[82]设计了具有多有源区隧道结分布式布拉格反射宽区激光器。这些

激光器通过 10 kHz 的纳秒电流脉冲进行驱动, 实现脉宽为 10 ns 的光脉冲。其中, 具有五层有源区的激光器在 210 A 的脉冲电流下达到 420 W 峰值功率, 在峰值功率为 100 W 时相应的亮度高达 300 MW·

cm⁻²·sr⁻¹。这种通过多层有源区激光器实现高峰值功率输出的方法, 是激光雷达研究领域中的一种常用技术方案^[83]。典型隧道结激光器结构和折射率、驻波光场分布如图 11 所示^[84]。

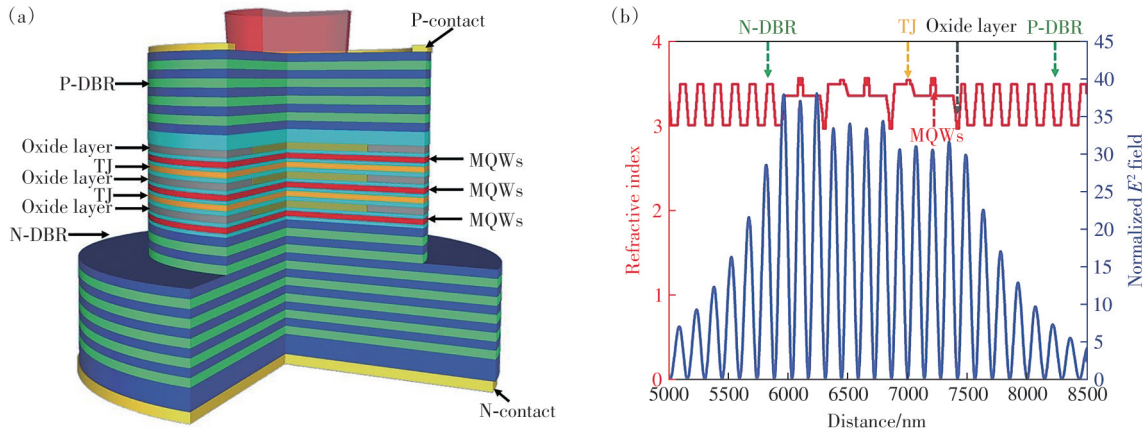


图 11 (a) 典型隧道结激光器结构示意图; (b) 折射率、驻波光场分布^[84]

Fig.11 (a) Schematic diagram of the typical tunnel junction laser structure. (b) Refractive index distribution, standing wave light field distribution^[84]

2025 年, OSRAM 公司^[85]推出新型五结边发射激光器。相比前代三结技术, OSRAM 此次推出的五结激光器峰值功率显著提升, 最高达 155 W, 同时功耗更低。传统三结激光器已将探测距离较常

规激光器提升 50%, 而五结激光器更进一步突破。

表 5 总结了纳秒脉冲驱动高亮度边发射半导体激光器研究进展。由表中可知, 激光器的侧向光束质量因子和峰值功率受器件结构直接调控。

表 5 纳秒脉冲高亮度边发射半导体激光器研究进展

Tab. 5 Advances in nanosecond-pulsed high-brightness edge-emitting semiconductor lasers

年份	器件结构	脉冲宽度/ns	重复频率/Hz	侧向光束质量因子(M ²)	峰值功率/W	参考文献
2016	窄脊	0.8	80M	1.55	4	[77]
2018	宽区	10	10k	9	34	[78]
2021	主振荡功率放大器	3.3	10k	2.2	18	[79]
2023	主振荡功率放大器	3	10k	3.6	6.5	[80]
2024	宽区	31	—	—	19.4	[81]
2025	宽区(五结)	10	10k	39.5	100	[82]
2025	宽区(五结)	50	2k	—	155	[85]

脉冲驱动技术凭借其优越的热管理性能, 可有效确保高亮度边发射半导体激光器的稳定运行, 促进器件实现高峰值功率与高亮度输出。对于用于距离测量的直接飞行时间 (Direct time of flight, DTOF) 激光雷达而言, 系统所需要的脉宽范围大概在 100 ps~10 ns 之间^[69], 更高的峰值功率能扩大其探测距离^[86], 而更高的频率、更窄的脉宽及更小的发散角则可提升其探测分辨率^[87]。未来研究应进一步聚焦于驱动电路与激光器的集成小型化, 并推动脉冲驱动参数向更高频率、更窄脉宽方向发展。

5 展 望

目前, 窄脊波导结构、损耗剪裁微结构、PT 对

称波导、超对称波导、非均匀波导等创新设计, 显著提升了侧向模式控制能力, 使高亮度边发射半导体激光器在高功率输出条件下仍能保持优异的侧向光束质量。同时, 垂直方向的外延结构优化, 如超大光学腔、光子晶体及 HiBBEE 结构等, 进一步降低了垂直方向远场发散角, 满足了高亮度激光器的性能指标要求。为进一步提升边发射半导体激光器综合性能, 同步调控垂直远场发散角与侧向模式实现协同优化。例如, 将 HiBBEE 结构与非均匀波导结构复合, 可同时实现高侧向光束质量与低垂直远场发散角, 输出近似圆形的光斑, 在高亮度应用场景中展现出优异适配性, 为高亮度激光器的发展提供新技术路径。针对激光雷达

应用场景,采用多有源区隧道结激光器可进一步提升激光雷达的输出功率,进而扩大其探测距离。基于 GaN 开关元件的驱动电路所具备的高频、低损耗、高功率密度等特性,在半导体激光器脉冲驱动电路中发挥关键作用。脉冲驱动技术的应用有效抑制了有源区热积累,提升了高亮度半导体激光器的峰值功率,最终实现高亮度激光输出。

未来,为解决窄脊波导带来的功率瓶颈,可引入锥形波导段构建主振荡功率放大器(Master oscillator power-amplifier, MOPA)结构,既保留窄脊波导单模工作的高光束质量特性,又通过锥形波导段实现输出功率放大^[88]。但是,脊波导与锥形波导不匹配会直接导致像散,这种像散源于两者在波导截面几何形状、模式场分布及光场约束特性的差异。针对这一问题,可在锥形波导中嵌入光栅结构,对光场模式选择性约束或放大。损耗剪裁微结构和非均匀波导基于其模式调控方法可有效提高器件侧向光束质量,该类研究仍存在优化空间。在理论计算层面,除重点考量波导结构对侧向模式调控作用外,还需考虑热累积引发的器件损耗、载流子扩散对增益分布的改变,通过构建更精准的仿真模型,实现侧向模式的精准调控。在脉冲驱动器方面,随着材料工艺的进步与产业链的成熟,GaN 开关元件有望成为下一代高效能

驱动电路的主流选择,并与激光器实现小型化集成封装,优化电路布局,降低寄生效应和阻抗失配对输出的影响,推动高亮度半导体激光器向更高功率、更小尺寸、更低能耗方向发展。通过对脉冲参数的精准调控以适配多元应用场景需求,可加速器件在激光雷达、精密加工等高端领域的实用化进程。此外,近年来垂直腔面发射激光器领域涌现出兼具新颖设计与独特技术的创新器件。例如,光子晶体垂直腔面发射激光器(Photonic crystal surface-emitting laser, PCSEL)借助光子晶体的周期调控特性,可实现大面积单模出光与低远场发散角^[89]。拓扑腔面发射激光器(Topological-cavity surface-emitting laser, TCSEL)采用“狄拉克涡旋”拓扑光腔设计,优势是大面积单模出光和波长灵活性^[90]。水平腔表面发射激光器(Horizontal cavity surface-emitting laser, HCSEL)具有水平谐振、垂直腔面发射特点,融合了晶圆级整体流片和大功率的优点^[91]。上述三类新型器件的制备工艺较复杂,未来有望通过技术迭代推动规模化应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250272>

参 考 文 献:

- [1] PIETRZAK A, ZORN M, HUELSEWEDE R, *et al.* Development of highly efficient laser diodes emitting around 1 060 nm for medical and industrial applications [C]. *Proceedings of SPIE 10900, High-Power Diode Laser Technology X VII*, San Francisco, 2019: 109000K.
- [2] LI Y, IBANEZ-GUZMAN J. Lidar for autonomous driving: the principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems [J]. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2020, 37(4): 50-61.
- [3] KING B, ARSLAN S, DELLA CASA P, *et al.* High-efficiency and high-brightness broad area laser diodes with buried implantation current blocking [J]. *Phys. Scripta*, 2024, 99(5): 055528.
- [4] MAXIMOV M V, SHERNYAKOV Y M, NOVIKOV I I, *et al.* High-performance 640-nm-range GaInP-AlGaInP lasers based on the longitudinal photonic bandgap crystal with narrow vertical beam divergence [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, 41(11): 1341-1348.
- [5] 汪丽杰, 佟存柱, 王延靖, 等. 半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展 [J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 895-911.
 WANG L J, TONG C Z, WANG Y J, *et al.* Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2022, 15(5): 895-911. (in Chinese)
- [6] NOVIKOV I I, KARACHINSKY L Y, MAXIMOV M V, *et al.* Single mode cw operation of 658 nm AlGaInP lasers based on longitudinal photonic band gap crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(23): 231108.
- [7] MAXIMOV M V, SHERNYAKOV Y M, NOVIKOV I I, *et al.* High-power low-beam divergence edge-emitting semiconductor lasers with 1- and 2-D photonic bandgap crystal waveguide [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2008,

- 14(4): 1113-1122.
- [8] KETTLER T, POSILOVIC K, KARACHINSKY L Y, *et al.* High-brightness and ultranarrow-beam 850-nm GaAs/AlGaAs photonic band crystal lasers and single-mode arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, 15(3): 901-908.
- [9] LAMBERT R W, AYLING T, HENDRY A F, *et al.* Facet-passivation processes for the improvement of Al-containing semiconductor laser diodes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, 24(2): 956-961.
- [10] DONG L Z, MI Q G, ZHOU S Y, *et al.* Precise and fast LiDAR *via* electrical asynchronous sampling [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(19): e00204.
- [11] ROSALES R, ROBLLOT J, KALOSHA V, *et al.* 1 060-nm high brightness picosecond pulse generation in photonic band crystal lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016, 28(19): 2086-2089.
- [12] REN Z Q, LI Q M, LI B, *et al.* High wall-plug efficiency 808-nm laser diodes with a power up to 30.1 W [J]. *J. Semicond.*, 2020, 41(3): 032901.
- [13] ALBRODT P, JAMAL M T, HANSEN A K, *et al.* Coherent combining of high brightness tapered amplifiers for efficient non-linear conversion [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(2): 928-937.
- [14] 赵天圣. 平板耦合光波导半导体激光器结构设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
ZHAO T S. *Design on Slab-Coupled Optical Waveguide Semiconductor Laser Structure* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] HUANG R K, DONNELLY J P, MISSAGGIA L J, *et al.* High-power nearly diffraction-limited AlGaAs-InGaAs semiconductor slab-coupled optical waveguide laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2003, 15(7): 900-902.
- [16] HUANG R K, DONNELLY J P, MISSAGGIA L J, *et al.* High-brightness slab-coupled optical waveguide lasers [C]. *Proceedings of SPIE 6485, Novel In-Plane Semiconductor Lasers VI*, San Jose, 2007: 64850F.
- [17] ABBASI S P, MAHDIEH M H. Design of diode laser using slab coupled optical waveguide with graded refractive index structure [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 147: 107654.
- [18] CRUMP P, LEISHER P, MATSON T, *et al.* Control of optical mode distribution through etched microstructures for improved broad area laser performance [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(13): 131113.
- [19] CHEN C, LEISHER P, PATTERSON S, *et al.* Stabilization of lateral mode transients in high-power broad area semiconductor lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(1): 011107.
- [20] WANG T, TONG C Z, WANG L J, *et al.* Injection-insensitive lateral divergence in broad-area diode lasers achieved by spatial current modulation [J]. *Appl. Phys. Express*, 2016, 9(11): 112102.
- [21] WANG T, WANG L J, SHU S L, *et al.* Beam control of high-power broad-area photonic crystal lasers using ladderlike groove structure [J]. *Appl. Phys. Express*, 2017, 10(6): 062701.
- [22] RONG J M, XING E B, ZHANG Y, *et al.* Low lateral divergence 2 μm InGaSb/AlGaAsSb broad-area quantum well lasers [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(7): 7246-7252.
- [23] SU J X, TONG C Z, WANG L J, *et al.* Selective loss tailoring of broad-area diode lasers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2021, 60(2): 020901.
- [24] WANG T, WANG L J, SHU S L, *et al.* Suppression of far-field blooming in high-power broad-area diode lasers by optimizing gain distribution [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2017, 15(7): 071404.
- [25] CHANG J Y, XIONG C, QI Q, *et al.* A high-power fundamental-mode lateral microstructure laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2023, 35(16): 862-865.
- [26] SHI J M, YANG C G, CHEN Y H, *et al.* Precise mode control of mid-infrared high-power laser diodes using on-chip advanced sawtooth waveguide designs [J]. *High Power Laser Sci. Eng.*, 2024, 12: e42.
- [27] LIU L, ZHANG J X, WANG Y F, *et al.* 500-mW CW single-lobe emission from laterally coupled photonic crystal laser arrays [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2012, 24(19): 1667-1669.
- [28] 韩缙, 樊元成, 张正仁. 表面等离子激元在具有PT对称性的环谐振器中的传输 [J]. *发光学报*, 2012, 33(8): 901-904.
HAN J, FAN Y C, ZHANG Z R. Propagation of surface plasmon polaritons in a ring resonator with PT-symmetry [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(8): 901-904. (in Chinese)
- [29] COOPER F, KHARE A, SUKHATME U. Supersymmetry and quantum mechanics [J]. *Phys. Rep.*, 1995, 251(5-6): 267-385.

- [30] MIRI M A, LIKAMWA P, CHRISTODOULIDES D N. Large area single-mode parity-time-symmetric laser amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(5): 764-766.
- [31] FU T, WANG Y F, ZHOU X Y, *et al.* Approaches to tuning the exceptional point of PT-symmetric double ridge stripe lasers [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(13): 20440-20448.
- [32] ŞEKER E, OLYAEFFAR B, DADASHI K, *et al.* Single-mode quasi PT-symmetric laser with high power emission [J]. *Light Sci. Appl.*, 2023, 12(1): 149.
- [33] XU Y B, FU T, FAN J, *et al.* High-power supersymmetric semiconductor laser with a narrow linewidth [J]. *Photonics*, 2023, 10(3): 238.
- [34] WANG L C, WANG Y F, DONG F X, *et al.* Loss-tailoring single-mode high-power supersymmetric lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(11): 3078-3081.
- [35] KALOSHA V P, POSILOVIC K, BIMBERG D. Lateral-longitudinal modes of high-power inhomogeneous waveguide lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, 48(2): 123-128.
- [36] MIAH M J, STROHMAIER S, URBAN G, *et al.* Beam quality improvement of high-power semiconductor lasers using laterally inhomogeneous waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(22): 221107.
- [37] WU C K, XUE X E, TIAN S C, *et al.* Improvement of beam quality of high-power edge-emitting lasers using inhomogeneous waveguides [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(14): 24802-24810.
- [38] 谭少阳, 王皓, 张瑞康, 等. 大功率高光束质量 1 060 nm 大光腔非对称波导半导体激光二极管 [J]. *光学学报*, 2015, 35(S1): s114006.
TAN S Y, WANG H, ZHANG R K, *et al.* High power high beam quality 1 060-nm large optical cavity asymmetric waveguide semiconductor laser diode [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2015, 35(S1): s114006. (in Chinese)
- [39] WENZEL H, BUGGE F, DALLMER M, *et al.* Fundamental-lateral mode stabilized high-power ridge-waveguide lasers with a low beam divergence [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, 20(3): 214-216.
- [40] PIETRZAK A, WENZEL H, CRUMP P, *et al.* 1 060-nm ridge waveguide lasers based on extremely wide waveguides for 1.3-W continuous-wave emission into a single mode with FWHM divergence angle of $9^\circ \times 6^\circ$ [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, 48(5): 568-575.
- [41] ZHAO S Y, QI A Y, WANG M J, *et al.* High-power high-brightness 980 nm lasers with >50% wall-plug efficiency based on asymmetric super large optical cavity [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(3): 3518-3526.
- [42] ZHANG J, MA X L, ZHOU X Y, *et al.* Mode engineering of semiconductor lasers with vertical periodic layered structures [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2022, 55(6): 065102.
- [43] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, *et al.* *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* [M]. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- [44] YE H P, YARIV A, HONG C S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, 67(4): 423-438.
- [45] POSILOVIC K, KALOSHA V P, WINTERFELDT M, *et al.* High-power low-divergence 1 060 nm photonic crystal laser diodes based on quantum dots [J]. *Electron. Lett.*, 2012, 48(22): 1419-1420.
- [46] 李珍, 汪丽杰, 侯冠宇, 等. 布拉格反射波导光子晶体宽光谱量子阱激光器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(3): 349-353.
LI Z, WANG L J, HOU G Y, *et al.* Quantum well lasers with broad spectra based on Bragg reflection waveguide [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2017, 36(3): 349-353. (in Chinese)
- [47] MIAH J, KETTLER T, POSILOVIC K, *et al.* 1.9 W continuous-wave single transverse mode emission from 1 060 nm edge-emitting lasers with vertically extended lasing area [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(15): 151105.
- [48] MIAH J, KETTLER T, KALOSHA V P, *et al.* High temperature operation of 1 060-nm high-brightness photonic band crystal lasers with very low astigmatism [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2015, 21(6): 4900206.
- [49] MIAH J, KALOSHA V P, ROSALES R, *et al.* Novel types of photonic band crystal high power and high brightness semiconductor lasers [J]. *Front. Optoelectron.*, 2016, 9(2): 225-237.
- [50] LIU L, QU H W, LIU Y, *et al.* High-power narrow-vertical-divergence photonic crystal laser diodes with optimized epitaxial structure [C]. *Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference 2014, Shanghai*, 2014: 1-3.
- [51] MA X L, LIU A J, QU H W, *et al.* Nearly diffraction-limited and low-divergence tapered lasers with photonic crystal

- structure [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016, 28(21): 2403-2406.
- [52] CHEN Z H, QI A Y, ZHOU X Y, *et al.* High power and narrow vertical divergence laser diodes with photonic crystal structure [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021, 33(8): 399-402.
- [53] FU T, WANG Y F, ZHOU X Y, *et al.* Transverse photonic crystal mode engineering for broad-area semiconductor lasers with narrow-divergence angles [J]. *IEEE Photonics J.*, 2023, 15(1): 1500305.
- [54] WANG L, ZHANG Y, QU H W, *et al.* Optimized thermal management in 976 nm photonic crystal laser diodes [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2025, 23(8): 081402.
- [55] 刘祥, 吴承坤, 薛晓娥, 等. 高亮度 1 060 nm HiBBEE 锥形半导体激光器 [J]. *发光学报*, 2025, 46(7): 1310-1316.
- LIU X, WU C K, XUE X E, *et al.* 1 060 nm high-brightness HiBBEE tapered semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(7): 1310-1316. (in Chinese)
- [56] MIAH J, KALOSHA V P, BIMBERG D, *et al.* Astigmatism-free high-brightness 1 060 nm edge-emitting lasers with narrow circular beam profile [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(26): 30514-30522.
- [57] WU C K, XUE X E, TIAN S C, *et al.* Brightness improvement of edge-emitting lasers by combining vertical broad-area HiBBEE and laterally inhomogeneous waveguides [J]. *APL Photonics*, 2024, 9(12): 126113.
- [58] SINGH N, LORENZEN J, SINOBAD M, *et al.* Silicon photonics-based high-energy passively *Q*-switched laser [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(5): 485-491.
- [59] 赵辉, 王蓓, 夏敬华, 等. 自相似锁模超短脉冲掺铒光纤激光器 [J]. *发光学报*, 2025, 46(1): 110-116.
- ZHAO H, WANG J, XIA J H, *et al.* Self-similar mode-locked ultrashort pulse erbium-doped fiber amplifier [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(1): 110-116. (in Chinese)
- [60] 陈河, 陈胜平, 侯静, 等. 超短脉冲增益开关半导体激光系统研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110001.
- CHEN H, CHEN S P, HOU J, *et al.* Research progress on ultrafast gain-switching laser diode system [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2012, 49(11): 110001. (in Chinese)
- [61] 李泽安, 王玉冰, 秦莉, 等. RLC 振荡的脉冲激光器驱动特性 [J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 510-517.
- LI Z A, WANG Y B, QIN L, *et al.* On the characteristics of pulsed laser driver based on RLC oscillation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(4): 510-517. (in Chinese)
- [62] 杨燕, 俞敦和, 吴姚芳, 等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制 [J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0202003.
- YANG Y, YU D H, WU Y F, *et al.* Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode [J]. *Chin. J. Lasers*, 2011, 38(2): 0202003. (in Chinese)
- [63] 陈彦超, 冯永革, 张缺兵. 用于半导体激光器的大电流纳秒级窄脉冲驱动电路 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 3145-3151.
- CHEN Y C, FENG Y G, ZHANG X B. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 3145-3151. (in Chinese)
- [64] 杜建艳, 赵毅强, 叶茂, 等. 窄脉宽大电流半导体激光器驱动电路研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(1): 0114008.
- DU J Y, ZHAO Y Q, YE M, *et al.* Study on driving circuit of narrow pulse width and large current semiconductor laser [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2022, 59(1): 0114008. (in Chinese)
- [65] WANG X Q, WANG B, WANG J H, *et al.* Compact sub-nanosecond pulse seed source with diode laser driven by a high-speed circuit [J]. *Opt. Commun.*, 2018, 416: 84-88.
- [66] TONG Z G, HUANG J W, MAO X Y, *et al.* A double pulse overlapping laser diode driver with minimum 100-ps pulse for LiDAR system [J]. *IEEE J. Solid-State Circ.*, 2025, 60(2): 555-567.
- [67] LIERO A, KLEHR A, SCHWERTFEGER S, *et al.* Laser driver switching 20 A with 2 ns pulse width using GaN [C]. *Proceedings of the 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim*, 2010: 1110-1113.
- [68] LIERO A, KLEHR A, HOFFMANN T, *et al.* GaN laser driver switching 30 A in the sub-nanosecond range [C]. *Proceedings of the 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), London*, 2016: 460-463.
- [69] KLEHR A, LIERO A, CHRISTOPHER H, *et al.* Wavelength stabilized high pulse power 48 emitter laser bars for automotive light detection and ranging application [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2020, 35(6): 065016.

- [70] CHANG Y K, YUAN F, KOU Y X, *et al.* A GaN-Si hybrid integrated driver for narrow-pulse and high-current LiDAR applications [J]. *Front. Phys.*, 2022, 10: 1063730.
- [71] MING X, YE Z K, LIN Z Y, *et al.* A fully-integrated GaN driver for time-of-flight Lidar applications [C]. *Proceedings of the 2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Vancouver, 2022: 169-172.
- [72] LIU C Y, LIN C H, KUO H C, *et al.* High-frequency pulsed laser driver using complementary GaN HEMTs [J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2025, 40(2): 3370-3384.
- [73] 范贤光. 脉冲注入式半导体激光器电-光-热特性及其测试技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
FAN X G. *Study on the Electro-Opto-Thermal Characteristics and its Testing Technology of Laser Diode with Pulse Injection* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [74] 张孟迪. 量子级联激光器在高占空比脉冲工作模式下的功率特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
ZHANG M D. *Optical Power Property of Quantum Cascade Lasers Under High Duty-Cycle Pulsed Operation* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [75] TRAFICANTE D D. Impedance: what it is, and why it must be matched [J]. *Concepts Magn. Resonan.*, 1989, 1(2): 73-92.
- [76] LIU K N, WANG Y B, ZHANG J W, *et al.* Establishing equivalent circuits of mounted, high-power VCSEL arrays for iToF cameras [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(11): 3046-3049.
- [77] ROSALES R, KAIOSHA V P, HIMBERG D, *et al.* High brightness ps-pulses from 1 060-nm PBC semiconductor lasers [C]. *Proceedings of the 2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*, Waikoloa, 2016: 84-85.
- [78] KNIGGE A, KLEHR A, WENZEL H, *et al.* Wavelength-stabilized high-pulse-power laser diodes for automotive LiDAR [J]. *Phys. Status Solidi (A)*, 2018, 215(8): 1700439.
- [79] ZEGHUZI A, CHRISTOPHER H, KLEHR A, *et al.* High-brightness nanosecond-pulse operation from tapered-ridge-waveguide lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2021, 33(3): 151-154.
- [80] CHRISTOPHER H, BEIER M, FRICKE J, *et al.* Investigation of distributed Bragg reflectors tapered-ridge-waveguide lasers under nanosecond high pulse current excitation [C]. *Proceedings of SPIE 12440, Novel in-Plane Semiconductor Lasers XXII*, 124400I, San Francisco, 2023: 124400I.
- [81] 李莉, 李林, 应家驹, 等. 利用等效电路分析提高 1 550 nm 脉冲半导体激光发射模块性能 [J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(9): 0914009.
LI L, LI L, YING J J, *et al.* Performance improvement of 1 550 nm pulse laser diode transmitter module using equivalent electrical circuit analysis [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2024, 61(9): 0914009. (in Chinese)
- [82] AMMOURI N, CHRISTOPHER H, MAABDORF A, *et al.* 420 W pulse power from a 905 nm distributed Bragg reflector laser with multiple active regions and tunnel junctions [J]. *Phys. Scripta*, 2025, 100(7): 075514.
- [83] ZHANG C, LI H J, LIANG D. Antireflective vertical-cavity surface-emitting laser for LiDAR [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 1105.
- [84] 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.
- [85] OSRAM. SPL DP91A_5 [EB/OL]. (2025-11-02) [2025-12-21]. https://look.ams-osram.com/m/50b7d7cc0631e98b/original/SPL-DP91A_5.pdf.
- [86] 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.
- [87] 周昊, 毛庆洲, 李清泉. 采样频率和激光脉宽对全波形激光雷达测距精度的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(4): 20210363.
ZHOU H, MAO Q Z, LI Q Q. Influence of sampling frequency and laser pulse width on ranging accuracy of full-waveform LiDAR [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2022, 51(4): 20210363. (in Chinese)
- [88] 张益嘉, 付鑫鹏, 阮迪, 等. 固体 MOPA 激光器光束质量优化技术研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(10): 1916-1929.
ZHANG Y J, FU X P, RUAN D, *et al.* Research progress of beam quality optimization technology for solid-state MOPA lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(10): 1916-1929. (in Chinese)

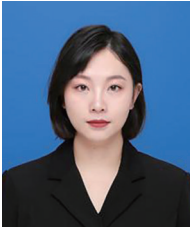
- [89] 潘绍驰,田思聪,王品尧,等. 高速光子晶体面发射激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2024, 45(3): 484-492.
PAN S C, TIAN S C, WANG P Y, *et al.* Research progress on high-speed photonic crystal surface-emitting lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(3): 484-492. (in Chinese)
- [90] YANG L C, LI G R, GAO X M, *et al.* Topological-cavity surface-emitting laser [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(4): 279-283.
- [91] 海一娜,邹永刚,田锐,等. 水平腔面发射半导体激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(2): 194-206.
HAI Y N, ZOU Y G, TIAN K, *et al.* Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2017, 10(2): 194-206. (in Chinese)



高翔(2000-),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,2023年于西安工业大学获得学士学位,主要从事脉冲驱动高亮度半导体激光器的研究。
E-mail: gxcimp@163.com



田思聪(1984-),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事高亮度半导体激光器和高速度垂直腔面发射激光器的研究。
E-mail: tiansicong@ciomp.ac.cn



薛晓娥(1994-),女,内蒙古乌兰察布人,硕士,工程师,2019年于鲁东大学获得硕士学位,主要从事高亮度半导体激光器的研究。
E-mail: xxe@ciomp.ac.cn



BIMBERG Dieter(1942-),男,德国籍,博士,教授,博士生导师,德国科学院院士,美国工程院院士,美国发明家学会院士,俄罗斯科学院院士,1971年于德国法兰克福歌德大学获得博士学位,主要从事量子点激光器、高速垂直腔面发射激光器、高亮度半导体激光器的研究。
E-mail: bimberg@physik.tu-berlin.de