中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展

汪丽杰 佟存柱 王延靖 陆寰宇 张新 田思聪 王立军

Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers

WANG Li-jie, TONG Cun-zhu, WANG Yan-jing, LU Huan-yu, ZHANG Xin, TIAN Si-cong, WANG Li-jun

引用本文:
汪丽杰, 佟存柱, 王延靖, 陆寰宇, 张新, 田思聪, 王立军. 半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展[J]. 中国光学, 2022, 15(5): 895-911. doi: 10.37188/CO.2022-0143
WANG Li-jie, TONG Cun-zhu, WANG Yan-jing, LU Huan-yu, ZHANG Xin, TIAN Si-cong, WANG Li-jun. Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 895-911. doi: 10.37188/CO.2022-0143

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022-0143

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锥形半导体激光器研究进展

Progress of tapered semiconductor diode lasers

中国光学（中英文）. 2019, 12(1): 48 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0048

板条激光器光束质量控制技术研究进展

Progress on beam quality control technology of slab lasers

中国光学（中英文）. 2019, 12(4): 767 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0767

水平腔面发射半导体激光器研究进展

Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers

中国光学（中英文）. 2017, 10(2): 194 https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0194

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学（中英文）. 2019, 12(2): 229 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229

10kW级直接输出半导体激光熔覆光源的研制与热效应分析

10 kW CW diode laser cladding source and thermal effect

中国光学（中英文）. 2019, 12(4): 820 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0820

12 W高功率高可靠性915 nm半导体激光器设计与制作

Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers

中国光学（中英文）. 2018, 11(4): 590 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0590

文章编号 2097-1842(2022)05-0895-17

半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展

汪丽杰[1,2], 佟存柱[1*], 王延靖[1], 陆寰宇[1], 张 新[1], 田思聪[1], 王立军[1]
（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130031）

摘要: 高功率半导体激光器在固体或光纤激光器泵浦、材料加工、激光雷达、空间通讯及国防等领域具有重大需求, 但传统器件面临发散角大、光束质量差、亮度低的难题, 限制了其直接应用。宽区半导体激光器具有输出功率和转换效率高的优点, 但其侧向模式受多种物理效应的影响, 高电流下激射模式数很大, 导致远场宽度随电流增大迅速展宽, 光束质量非常差, 成为制约半导体激光亮度提高的关键瓶颈难题。因此, 需要对半导体激光器的侧向模式进行控制。本文首先从半导体激光器的侧向模式影响机制出发, 分析了其侧向模式特性及光场分布与器件结构的关联关系; 接着, 介绍了目前主要的侧向模式控制技术, 通过抑制高阶模式及侧向远场展宽, 实现光束质量的改善及激光亮度的提升。采用先进的侧向模式控制技术, 可从芯片层次发展新型的高亮度半导体激光器, 有利于拓展半导体激光器应用领域及降低应用成本, 具有重要的研究意义。

关 键 词: 半导体激光; 侧向模式; 光束质量; 高亮度; 低发散角
中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2022-0143

Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers

WANG Li-jie[1,2], TONG Cun-zhu[1*], WANG Yan-jing[1], LU Huan-yu[1], ZHANG Xin[1], TIAN Si-cong[1], WANG Li-jun[1]
(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Jlight Semiconductor Technology Co., Ltd, Changchun* 130031, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn*

Abstract: High power diode lasers are widely used for pumping solid-state lasers and fiber lasers, material processing, laser radars, free-space optical communication, security and defense. However, conventional diode lasers suffer from large far-field divergence angles, poor beam quality and low brightness, which restricts their direct applications. Broad-Area diode Lasers (BALs) can achieve high output power and effi-

收稿日期: 2022-06-24; **修订日期:** 2022-07-19
基金项目: 国家自然科学基金（No. 62025506, No. 62134008, No. 61790584）; 中国科学院青年创新促进会（No. 2021217）; 长春市科技计划发展项目（No. 21SH6）
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62025506, No. 62134008, No. 61790584); Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. 2021217); Changchun City Science and Technology Development Plan (No. 21SH6)

ciency. However, their lateral mode is usually influenced by many physical mechanisms, leading to a large number of guided lateral modes at high-power operation. It results in a rapid increase of the far-field width and strongly deteriorated beam quality, limiting the improvement of diode lasers′ brightness. Therefore, the lateral modes should be carefully controlled. In this paper, the factors influencing the diode lasers′ lateral modes are reviewed, and the lateral mode characteristics, optical field distribution and their relations with the device construction are analyzed. Then, the current lateral mode control technologies are described in detail. The beam quality and brightness of the output beam can be enhanced via the suppression of high-order lateral modes and the far-field blooming effect. As a result of advanced lateral mode control, novel high-brightness diode lasers can be developed at the chip level, which is beneficial for developing new diode lasers applications and reducing their system cost.

Key words: diode laser; lateral mode; beam quality; high brightness; low divergence angle

1 引 言

半导体激光器是当前最有效的相干光源，它具有波长范围广、体积小、成本低、寿命长及可直接调制等优点，自其问世便成为信息领域的核心光源。随着其功率的不断提高，还在泵浦、材料加工、传感、显示、生物医疗、国防军事等许多领域获得了广泛应用[1-2]。目前全球半导体激光器市场规模已超过 60 亿美元[3]，带动了更大产值的激光系统及相关应用领域，并且随着新型应用场景的发展，其市场规模仍将迅速增长。

高功率半导体激光器是光纤激光器、固体激光器和碟片激光器高效且理想的泵源，其技术进步直接推动了这些激光器的发展。近些年来，光纤激光器凭借高效率、光束质量好、可靠性高、柔性化程度高等优点成为全球最重要的工业激光器，直接带动半导体激光泵源向更高功率、更高效率、更高亮度发展。

激光材料加工具有可控性强、精度高、速度快、节能等优点，成为智能制造中最重要的工具之一。与其它激光器相比，半导体激光系统具有高的电光转换效率，其作为直接光源应用于材料加工中有望大幅降低加工能耗，而且半导体激光具有较宽的波长范围，可很好匹配材料的吸收峰，在金、铜、塑料等特殊材料的加工应用中具有独特优势[4]。目前，半导体激光合束光源功率可达千瓦甚至万瓦以上，作为直接光源已在熔覆、表面处理、钎焊、打标等加工领域获得应用，但由于低亮度在钣金切割和深焊接等领域应用仍受限。

激光雷达在三维感测、智能机器人、座舱监测、自动驾驶及无人机导航等诸多领域具有非常广阔的应用前景，半导体激光器以“电调制+小型化+低成本+高效率+高可靠性”的特点，成为激光雷达信号发射光源的首选方案[5]。近年来激光雷达在各类消费电子领域应用发展迅速，但在无人驾驶、智能网联车等领域，仍面临探测距离、精度和分辨率低等难题，尚未实现规模化应用[6]。目前主要的激光雷达技术不管采取何种扫描方式，对激光器的需求基本是一致的，不仅要具有高的功率，还要具有低的光束发散，以提高探测距离及空间分辨率。

上述能量型应用均要求半导体激光具有高亮度，即兼具高的输出功率及高的光束质量，以获得高的能量密度。光束质量反映了激光的可汇聚度，通常用衍射极限倍数因子（M^2）或光参量积（BPP）表示。目前半导体激光器在输出功率上已取得很大进展，单管器件连续功率可达 30 W 以上，激光器巴条输出功率也可达 kW 以上[7-9]。然而，半导体激光器一直面临发散角大、光束质量差、亮度低的问题。传统半导体激光器的垂直方向波导较窄，容易实现单横模工作，虽然垂直发散角较大，但光束质量接近衍射极限。然而，高功率半导体激光器在侧向通常采用宽区结构，激光器多模工作，侧向光束质量很差，导致输出激光亮度很低。激光合束技术虽然可以大幅提高激光输出功率，但传统采用线阵、叠阵或空间合束等方式不会提高激光亮度。采用光谱合束、密集波长合束或相干合束等新兴合束技术可以大幅提高输出激光亮度，但合束光源的光束质量仍受限于单元激光芯

片的光束质量[10-12]。因此, 高功率半导体激光器的侧向光束质量是领域内亟需解决的关键难题, 严重阻碍了相关应用系统的技术发展及推广。

为发展高功率、高光束质量的半导体激光芯片及系统, 国际上先后启动了多项重大研究计划, 比如“ADHELS”、“BRIDLE”、“IMOTHEB”等, 在这些计划促动下半导体激光的亮度得到了明显改善。研究发现, 半导体激光器的侧向模式受多种物理效应的影响, 比如热透镜、载流子台面边缘集聚、烧孔、光束成丝、垂直外延结构、应变效应等[13-15]。这些效应相互影响且随电流变化, 导致侧向模式非常难以控制。针对上述效应, 学者们提出了大量方法来控制半导体激光器的侧向模式, 如反热透镜效应、台面边缘质子注入、锥形波导、倾斜波导、外腔结构、侧向谐振反导引结构、集成模式过滤结构等。采用这些方法可以一定程度上改善半导体激光器的侧向光束质量, 但通常会引起明显的功率和效率亏损, 而且目前对于侧向模式完全控制机理尚不清晰, 仍需要深入的研究。

综上可见, 高功率半导体激光的侧向模式控制已成为制约其应用发展的瓶颈问题, 如何在保证高功率、高效率输出条件下实现高的光束质量已成为目前科研界和产业界关注的热点。本文主要综述了半导体激光器侧向模式的影响因素, 介绍了其光束质量退化的基本机制, 以及针对各种效应采取的侧向模式控制方法及国内外进展情况, 最后阐述了今后可能的发展趋势与方向。

2　半导体激光器侧向模式影响因素

宽区半导体激光器是目前最主要的功率型半导体激光器, 它具有工艺简单、输出功率及转换效率高的优点, 但由于其具有大的空间跨度(相对于波长), 而且影响其性能的物理效应因素较多, 工作在复杂的多侧模, 其侧向远场随电流增大急剧增加, 光束质量非常差。如图 1(彩图见期刊电子版)所示, 半导体激光器的侧向模式特性受以下因素影响。

(1) 内建折射率差

在半导体激光器制备工艺中, 刻蚀台面或沟

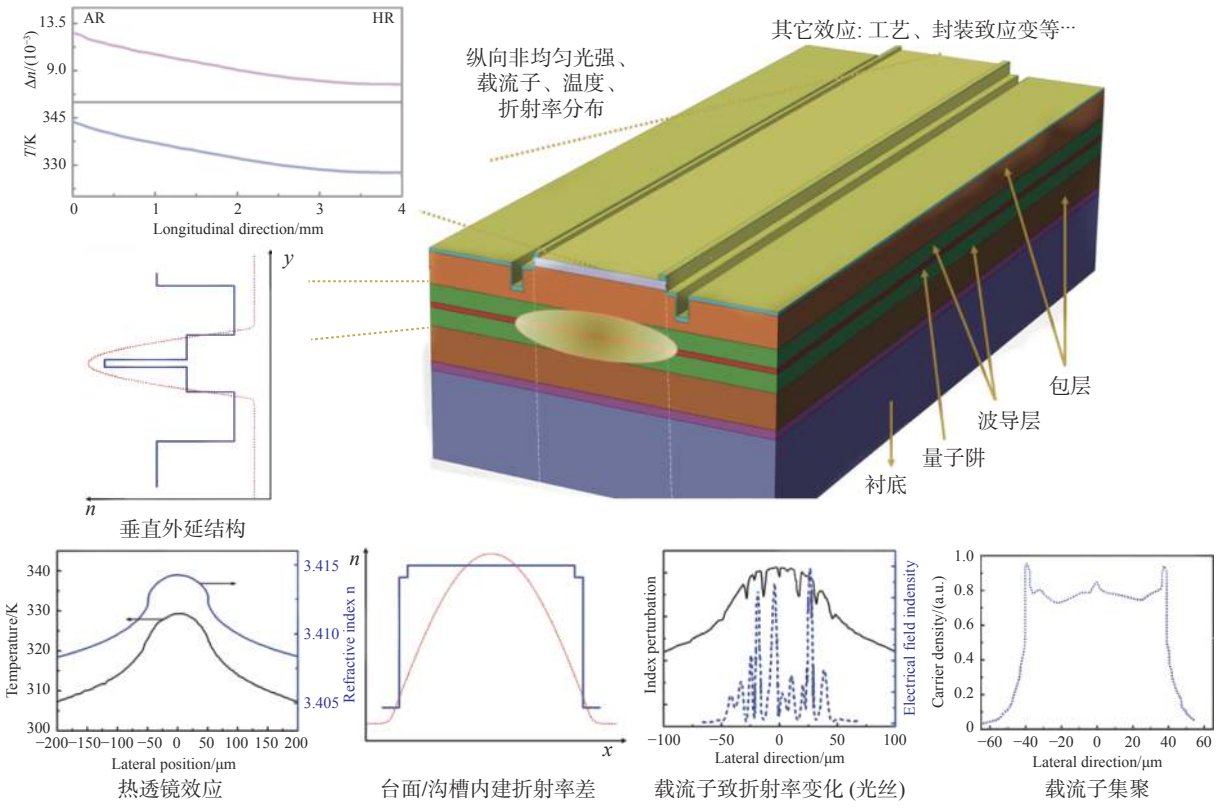

图 1　半导体激光器的侧向模式影响机制

Fig. 1　Influence mechanisms of diode laser lateral modes

槽会产生内建折射率台阶[16]。增大刻蚀深度会提高有效折射率差异，使得光限制增强，有利于导引更多模式，但会导致初始 BPP 值较高，但随电流增加其退化速率较低；相反，小的刻蚀深度可导致初始 BPP 值低，但随电流增加退化速率较快。

(2) 热透镜效应

半导体激光器工作时，产生的热会发生侧向扩散，导致温度梯变，进而引起折射率发生改变。通常增益条中心区域具有更高的温度及折射率，对光的限制增强，称为热透镜效应。高工作电流下的自热增加会增加侧向温度渐变，引起更大的折射率差及波导效应，导致各个侧模近场尺寸收缩及相应的远场展宽，并增大导引侧向模式数量，最终导致激光器的远场迅速展宽且光束质量恶化，如图 2 所示。热透镜效应与垂直外延结构设计、腔长、封装散热设计、芯片与热沉间势垒、工作方式等均有关[17]，它是半导体激光器光束质量随电流增大逐渐退化的主要因素。通常用下式来表征它们之间的关联关系：$BPP_{lat}=BPP_0+S_{th}\times T_{AZ}$，其中 BPP_{lat} 为侧向光参量积，BPP_0 为基态光参量积，S_{th} 为热效率，T_{AZ} 为有源区相对热沉的温升（可由波长漂移量及波长漂移系数确定）。

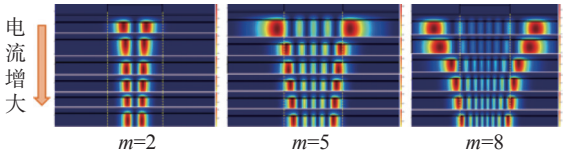

图 2 不同阶侧模随电流增大时光场分布变化

Fig. 2 Simulated near-field distributions of different order lateral modes as a function of increased current

(3) 侧向电流扩展及聚集

注入的载流子会发生侧向扩散，导致侧向载流子浓度分布及其引起的增益或损耗呈非均匀分布，特别是载流子会在台面边缘集聚，对高阶侧模提供更高的增益，增加激射侧模数量，导致远场展宽及光束质量恶化[18]。它是光束质量随电流增大逐渐恶化的另一主要因素。

(4) 光丝效应

由于增益饱和、自聚焦及载流子反导引会对光场产生高频调制[19]，引起动态/自组织的振荡效应（比如光丝），会使各阶模式光束质量恶化。但经过理论和实验对比，光丝效应对激光器总体光束质量的影响较小。

(5) 纵向空间烧孔

半导体激光器的前后腔面通常需要镀增透膜和高反射膜，这种非对称腔面反射率会使得纵向光强呈非均匀分布，进而导致非均匀的纵向-侧向温度、载流子、折射率及光场分布，影响侧向模式特性[20]。大的腔长、反射率差异及工作电流均会导致空间烧孔效应加剧。它不仅导致激光器增益和输出功率饱和，还会导致前腔面近场光斑的收缩，引起输出远场发散角增大。

(6) 垂直外延结构

半导体激光器的垂直方向外延结构设计不仅直接影响激光器的电阻、功率、效率及产生的自热，同时还强烈影响热透镜效应弯曲指数、对光束成丝的灵敏度以及纵向烧孔效应等[21]。适当降低外延结构的光限制因子，减弱光场与载流子的相互作用，有利于抑制光丝效应及纵向空间烧孔效应。另外，不同的半导体激光器外延材料，由于具有不同的热导率及载流子迁移率，也会直接影响热透镜效应及侧向载流子扩散效应等。

(7) 工艺或封装导致的应力

在半导体激光器制备及封装过程中，会在台面产生不均匀的应力，会支持寄生的 TM 模式及产生额外的折射率导引，不仅影响模式偏振特性，还会导致侧向光参量积增大。

半导体激光器不同阶侧模的近场分布和远场分布如图 3（彩图见期刊电子版）所示[22]。可见除基模远场展示高斯分布外，其它高阶模式的远场均为双主峰及旁瓣状，而且随着模式阶数的增大，远场两个主峰间的分离角也逐渐增大，相应的远场发散角也线性增加。由于高阶侧模具有更大的光模式尺寸及远场发散角，因此模式阶数越高、光束质量越差。

对于宽区半导体激光器，当工作电流增大时，自热效应会使折射率台阶增大，进而使各个侧模近场尺寸收缩及相应的远场展宽，高阶侧模的光限制因子增强。同时，载流子集聚效应为高阶侧模提供更高的增益，各阶侧模之间的增益差变小，模式分辨变差，使激射侧向模式数增加。因此，在高工作电流下，增加的侧向模式数及增大的各阶模式远场共同导致器件发散角展宽及光束质量恶化。在实际工作中，即使可以减少半导体激光器的侧模数量，但随着功率提高，各种动态效应也会在远场高角位置产生边峰，每阶模式的光束质量

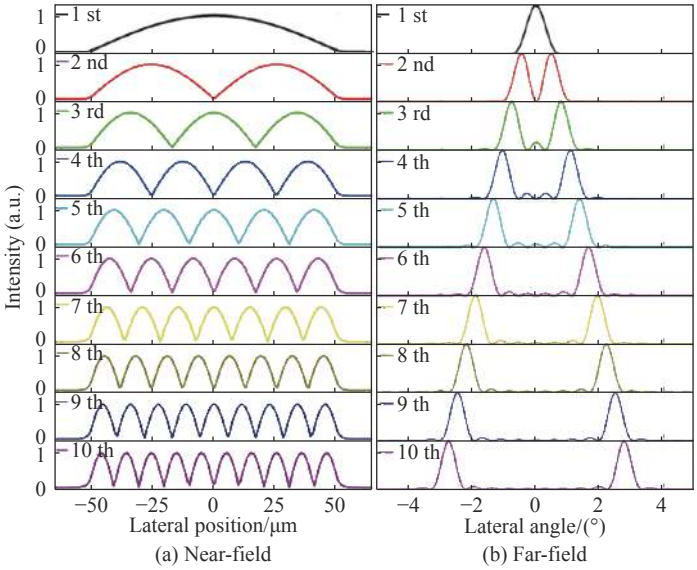

图 3　半导体激光器不同阶侧模的近场和远场分布

Fig. 3　Calculated (a) near-field and (b) far-field profiles of the lateral mode with different mode orders

也会退化。

由上可见, 半导体激光器的侧向光束质量随着输出功率的提高逐渐劣化, 光束质量因子或 BPP 值呈近似线性增长趋势, 而且激光器条宽越大光束质量越差。对于最常见的 90 μm条宽近红外半导体激光器, 初始激射侧模数在 10 个左右, 光参量积约为 1 mm·mrad, 但受热透镜及台面边缘载流子集聚等效应的影响, 在高电流工作下激射侧模数量可超过 50 个。因此, 光束质量会迅速变差, 光参量积通常大于 4 mm·mrad, 这将导致侧向亮度($B_{lat}=P_{out}/BPP_{lat}$, P_{out} 为输出功率)通常低于 3 W/mm·mrad[23-24]。

半导体激光器的远场由谐振腔内光场分布决定, 控制远场需要控制近场, 如能解决, 则可以改善光束质量。对于宽区半导体激光器, 为实现高侧向光束质量, 需要采取大量模式控制方法来增强基模或低阶模式与高阶模式间的增益损耗差异, 实现模式选择, 降低激射模式数, 从而实现光束质量的改善。

3　半导体激光器侧向模式控制方法

3.1　降低激光器条宽

对于传统的全反射波导或增益波导, 随着波导宽度的增加, 不仅导引模式数增加, 各阶侧模的模式有效折射率差也将缩小, 所有模式的限制因子增加, 相应各阶侧模的光限制因子差将大幅减小, 导致光束质量变差。因此, 为提高半导体激光器的亮度, 最常见的方法是降低半导体激光器的条宽, 减少激射侧模数, 改善侧向光束质量。

采用极窄脊型波导(条宽通常低于 5 μm)可实现单侧模工作。但受光模式尺寸小的限制输出功率低, 增大垂直方向光模式尺寸不仅可以提高灾变损伤阈值, 还可以提高单侧模工作波导宽度, 有利于提高输出功率。2016 年, 柏林工业大学制备的 8 μm 脊宽的 1 060 nm 高亮度纵向光子带晶体(PBC)激光器最高连续输出功率为 2.2 W, 相应的垂直和侧向光束质量因子分别为 1.9 和 2.1, 最高转换效率为 34% [25]。2018 年, 中国科学院半导体研究所报道了 7μm 脊宽的 980 nm 非对称大光腔激光器最高连续功率可达 2.4 W, 相应的转换效率由最高的 54.8% 降至 35%, 在 1.9 W 输出功率时垂直和侧向光束质量因子分别为 1.47 和 1.77[26]。采用平板耦合波导激光器(SCOWL)结构, 单模工作连续功率可超过 3 W, 相应的转换效率由最高的 45% 降至 25% [27]。可见, 采用窄脊形波导结构虽然可以获得近衍射极限光束质量, 但输出功率较低, 而且转换效率相比宽区激光器衰减非常大。

为获得更高的输出功率和转换效率, 可以适当提高激光器条宽, 在输出功率和光束质量间折衷[28]。德国 FBH (Ferdinand-Braun-Institute) 研究所采用离子注入的 30 μm 条宽激光器实现了 5 W

输出功率、侧向光束质量 M^2=3 的激光输出，相对于同等功率的 100 μm器件亮度提高 2~3 倍[29]。2018 年，该单位采用极双非对称（EDAS）大光腔结构，使 10 μm 脊宽半导体激光器的峰值转换效率达 62%，制备的 15 μm脊宽的激光器最高连续功率达到 2.7 W，最高功率输出时转换效率可达 59%，侧向光束质量为 2.2[30]。2018 年，该单位研制的 50 μm 条宽激光器在 10 ns 脉宽下实现了 30 W 脉冲功率、M^2=9，侧向亮度约 11 W/mm·mrad[31]。

3.2 窄脊波导与功率放大单元集成

为实现高功率、高光束质量激光输出，可在宽区半导体激光器中引入选模设计，以改善光束质量，从而提高亮度。当前提高侧向光束质量较常见的方法为锥形激光器、种子振荡功率放大器（MOPA）结构。

3.2.1 锥形激光器

锥形激光器是最常见的高亮度半导体激光器，经过 20 余年的发展，其性能得到了非常大的提高。锥形激光器的谐振腔包含直的脊型波导部分和锥形部分，有的还引入腔损坏结构或额外的吸收器滤除高阶模，通过结合脊型波导的模式过滤及锥形部分功率放大效应，可实现高光束质量、高功率激光输出。对于锥形激光器，需要系统优化其脊形波导部分的宽度和长度、锥形张角及增益区尺寸、腔破坏凹槽及位置、腔面反射率等参数[32]，部分器件后腔面采用分布布拉格反射镜（DBR）结构，也有的器件脊形与锥形增益区单独加电极分别调制，以获得更高亮度。锥形激光器容易实现非常高的亮度，其缺点是存在输出功率及效率下降、散光等问题，而且其远场通常具有旁瓣，虽然在 $1/e^2$ 定义光束质量非常接近衍射极限，但含 95% 功率或二阶矩法测得的光束质量因子会明显增大。

FBH 目前保持着 GaAs 基锥形激光器的最高性能指标，其中：635 nm 波长器件在 1 W 功率下光束质量接近衍射极限，0.5 W 功率下工作寿命超过 2000 h[33]；783 nm 波长 DBR 锥形激光器最大输出功率可达 7 W，光谱线宽小于 19 pm，侧向光束质量 M^2=2.5 ($1/e^2$)，但二阶矩法测得的光束质量因子为 8.3[34]；808 nm 波长器件近衍射极限连续输出功率可达 4.4 W，光束质量 M^2=1.9，在 3.9 W 功率下 M^2=1.3，亮度为 460 MW·cm^{-2}·sr^{-1}[35]，在脉冲条件下近衍射极限输出功率可达 9 W[36]；979 nm 波长 DBR 锥形激光器的连续输出功率达到了 12 W，转换效率约为 44%，在 11.4 W 时光束质量 M^2 ($1/e^2$)=1.1，亮度可达 1100 MW·cm^{-2}·sr^{-1}[37]；1030 nm 波长的 DBR 锥形激光器输出功率可达 12.7 W，该功率下转换效率为 40%，10.5 W 时光束质量仅为 M^2=1.1 ($1/e^2$)，中心瓣功率为 8.1 W[38]，通过进一步优化锥形结构，输出功率可提高至 15.5 W，中心瓣功率最高可达 10.1 W[39]；1060 nm 波长 DBR 锥形激光器输出功率达到了 12.2 W，光束质量仅为 M^2=1.2 ($1/e^2$)，线宽只有 17 pm (FWHM)，亮度可达 800 MW·cm^{-2}·sr^{-1}[40]。

锥形结构在采用其他衬底，比如 GaN、InP、GaSb 基半导体激光器及量子级联激光器等中都得到了验证[41-43]，均实现了很高的亮度。

3.2.2 MOPA

MOPA 结构是将具有较小功率和极高光束质量的单模激光注入到半导体放大器中进行放大，它可以采用混合或集成结构。在混合结构中，种子振荡源（MO）发射的激光束通过高数值孔径光学系统聚焦到功率放大器（PA）中，两个元件彼此间光和热隔离，可以分别优化，但需要高精度的对准半导体器件和微光学元件。在集成结构中，MO 部分通常采用布拉格光栅结构以确保反馈和激射。

FBH 报道的 1083 nm 波长混合结构 MOPA 最大连续输出功率可达 7.4 W，边模抑制比 SMSR>40 dB[44]。采用单片集成结构，977 nm 波长 MOPA 连续输出功率可超过 10 W，接近衍射极限，光谱线宽仅为 40 pm[45]。采用单片集成种子振荡倾斜锥形功率放大器，在 1060 nm 获得了 9.5 W 功率，发射光谱线宽小于 20 pm，并可获得近衍射极限的光束质量 (M^2<1.5 ($1/e^2$))，但其二阶矩法测得的光束质量很差，$M^2(D4\sigma)$>13.9[46]；在 964 nm 波长获得了 16.3 W 脉冲峰值功率，宽谱宽度为 10 pm[47]。

3.2.3 锥形-脊形-波导结构

由于锥形激光器的侧向和横向光束束腰位置不同，散光较大，不利于光束耦合，而且其转换效率和输出功率相对于同样的宽区器件的下降非常明显。因此，一些变化结构也被采用，比如喇叭形、双锥型等。特别是为改善锥形激光器的散光、含 95% 能量光束质量差以及转换效率低的问题，FBH 采用改进的侧向和纵向波导设计，即集

成窄脊+锥形过渡+宽脊结构, 15 μm 宽输出口径激光器实现了 2.5 W 连续功率、侧向 M^2=1.1 的激光输出(侧向亮度高达 7.5 W/mm·mrad)[48]; 23 μm 宽输出口径在 3.3 ns 脉宽下实现了 18 W 输出功率, 光参量积仅为 0.7 mm·mrad (M^2=2.2), 相应侧向亮度高达 27.4 W/mm·mrad, 这也是当前报道的半导体激光芯片级最高亮度[49]。

3.3　抑制热透镜效应

由于热透镜效应是半导体激光器在高电流工作(特别是连续工作模式)下侧向光束质量退化的主要因素之一, 因此通过控制散热途径, 降低热致折射率差异, 有利于改善激光器的光束质量。除传统提高激光器效率、改变腔长及改善封装等降低热阻方法外, 还有一些方法被提出, 主要是通过将侧向-垂直方向二维热传导变成沿垂直方向一维传输, 以减小发光区侧向温度梯变, 从而降低热透镜效应影响。

1988 年, 美国桑迪亚国家实验室提出一种对热沉采用非均匀加热的方法[50], 其在固定工作电流下采用外部可聚焦的激光加热源对发光区中心区域加热时, 激射模式阶数明显增大, 而对热沉中发光区外部加热时, 激射模式向基模转移。由此验证通过调控侧向热分布, 可在宽的电流区间内控制激射模式。

2011 年, nLight 公司提出了一种微观调控半导体激光器热流通道的方法[51]。该方法在发光区下方设置相同宽度的热传导通道, 使在热沉侧向热扩散前一段距离内只能沿垂直方向散热。尽管这种方式会引起热阻的些许增大, 但侧向温度差异可明显降低, 当仅在发光区上蒸镀 20 μm 厚金焊接柱时, 侧向亮度可提升 14% 以上。

2012 年, 韩国延世大学提出采用支座型热沉来抑制侧向热扩散[52], 在发光区与热沉焊接区两侧引入空气带隙, 通过一维垂直散热方式来降低温度渐变, 可获得近乎平坦的侧向温度分布, 从而使整个发光区的折射率差异明显降低。采用这种热沉, 激光器巴条在 350 A 连续电流工作下的侧向发散角从传统平坦热沉封装时的 13°降至 6.5°。

上述方法可以一定程度降低远场热展宽效应, 但由于器件内部平均温度升高可能会降低激光器功率。2018 年, 韩国延世大学理论研究了一种基于衬底 lift-off 技术的热沉封装结构[53], 在底侧增加了一路热扩散通道, 通过双面散热来改善热阻及侧向温度梯变, 预期可改善功率和远场特性。

3.4　调控增益分布

侧向载流子扩散及在台面边缘聚集会增大高阶侧模增益, 如图 4(a)(彩图见期刊电子版)所示, 将导致激光器远场展宽及光束质量退化。因此, 半导体激光器侧向模式在台面边缘的增益-损耗分辨是影响光束质量的重要因素[54]。需要通过控制载流子注入形貌, 抑制载流子扩散及集聚效应, 减少侧向模式数及改善光束质量。

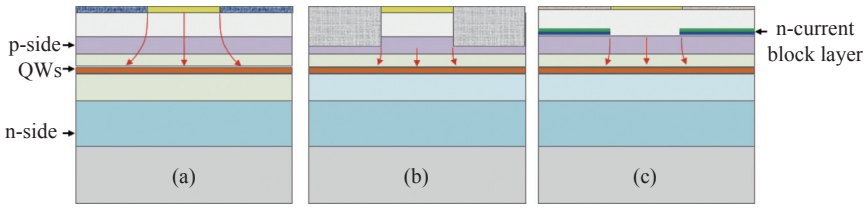

图 4　(a) 增益导引、(b) 质子注入及 (c) 二次外延电流阻挡层的半导体激光器侧向电流扩散示意图

Fig. 4　Schematic diagram of lateral current spreading for diode lasers utilizing (a) gain-guiding, (b) ion implantation, (c) current-blocking layers after the two-step epitaxial growth

为减少侧向电流扩展, 降低边缘自由载流子密度及扩展幅度, 可以采用掩埋节后或质子注入(H^+、He^+等)方法, 如图 4(b)(彩图见期刊电子版)所示。FBH 通过在 90 μm 宽半导体激光器 P 面电极两侧注入 H^+, 获得了平顶式侧向电流分布, 从而消除了载流子集聚效应, 并在有源区引入了约 10^{18} cm^{-3} 的缺陷密度。激光器的近场宽度和远场发散角均被降低, 光束质量改善了 35%, 在 7 W 功率下 BPP<2 mm·mrad[55]。

虽然采用高能质子注入可以有效阻止台面边缘的电流传输, 但会产生较多的缺陷及材料损伤, 可能导致激光器功率降低。为解决该问题, FBH 在 2020 年提出一种加强的自对准侧向结构, 通过二次外延生长引入电流阻挡层, 如图 4(c)(彩图见

期刊电子版）所示，首先在 p 型层上生长薄的 n 型掺杂层（对 GaAs 基器件通常为 GaAs-GaInP），在有源区附近形成 p-n-p 电流阻挡反偏层，将需要电流注入区域的电流阻挡层刻掉再二次生长后续外延层。该技术可明显降低激光器的阈值电流及侧向近场宽度，使侧向亮度提升 25%，转换效率也得到些许提升。该结构证明可同时提高激光器输出功率和光束质量，并可保持高的偏振度[56]。

另一些方法是采用周期性增益结构或在器件表面制备特殊电极结构，对注入载流子进行一维或二维调制，提高侧向远场的稳定性。1985 年，加州理工学院通过 H^+注入制备了一维周期性增益调控的激光器[57]，实现了近衍射极限的单瓣远场。相似的，很多单位采用多窄条电极来替代传统的单宽条电极[58]，来抑制高阶侧模及光丝的形成，可产生更加均匀的电流和功率分布，并可降低远场展宽效应。

1988 年，Amoco 等提出一种“领结”结构，通过改变侧向接触电极的有效长度实现对侧向模式的增益调控[59]。该结构可使中心区域具有最高增益，利于低阶模式工作，可有效改善侧向远场分布。2004 年，长春理工大学采用菱形电极半导体激光器[60]，实现了更接近高斯分布的近场形貌，输出功率也得到一定改善。

本课题组研制了一种棋盘式空间电流调制（SCM）激光器[61]，如图 5（彩图见期刊电子版）所示，通过调控电流在侧向和纵向周期性注入，降低台面边缘的载流子密度及热透镜效应，使得高阶侧模增益相应降低，从而可有效抑制侧向发散角的展宽。采用 SCM 结构，输出功率相对于传统的宽条器件降低很少，但随电流增大其侧向发散角几乎无变化，在 2.5 A 电流下侧向发散角、光参量积和光谱线宽分别相对传统器件降低约 34%、36.5% 和 45%。

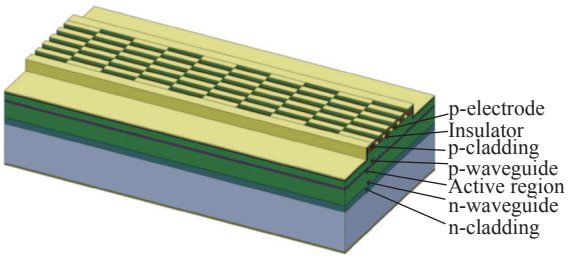

图 5 空间电流调制（SCM）半导体激光器的结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of diode laser with Spatial Current-Modulated (SCM) structure

此外，本课题组还研制了一种侧向脊波导宽区半导体激光器[62]，如图 6（彩图见期刊电子版）所示。通过在台面刻蚀多条脊形波导，对增益分布和谐振强度进行调制。调节脊形波导长度与激光器的腔长比 r，r=10% 和 r=20%，器件的输出功率相对于普通宽区结构（r=0%）有所提高，当 $r\geqslant$ 20% 时器件侧向发散角随注入电流的变化趋于稳定。因此，r=20% 的器件获得了更高的输出功率、更低的远场发散角和远场展宽效应，其侧向远场发散角随电流变化为 0.13°/A，仅为传统宽区器件远场电流依赖性（1.27°/A）的 10%。这种器件的输出功率、远场发散角及远场稳定性都得到了明显改善，可有效提高激光器亮度。

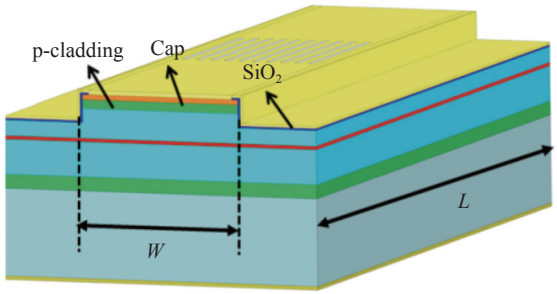

图 6 侧向脊波导宽区半导体激光器的结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of broad-area diode laser with multiple lateral ridge waveguides

布拉格反射波导激光器具有厚的 p 型波导，侧向载流子扩散及集聚较为严重。为此，本课题组将激光器台面边缘的高掺杂层刻掉，采用梯状的矩形沟槽结构（LLGS）[63]，如图 7（彩图见期刊电子版）所示。通过控制侧向折射率差和抑制边缘载流子累积来改善激光器的性能。LLGS 器件相对传统的宽区器件，阈值电流降低 9.5%，最高输出功率提高 18% 以上，LLGS 器件的侧向发散角减少了 20% 左右，其远场对注入电流的依赖性由传统宽区器件的 1.26°/A 降至 0.78°/A。

本课题组在锑化物中红外半导体激光器采用微条耦合宽区（MSBA）结构[64]，如图 8（彩图见期刊电子版）所示。通过周期性增益调制，抑制宽区锑化物激光器载流子侧向扩散、泄漏和积累，并降低热致温度渐变及折射率台阶，从而抑制高阶侧模。MSBA 器件相对于传统的宽区器件（BA）最高连续输出功率提高了 20%，最高连续功率可达 1.27 W，阈值电流特征温度由 58 K 提高至 107 K，

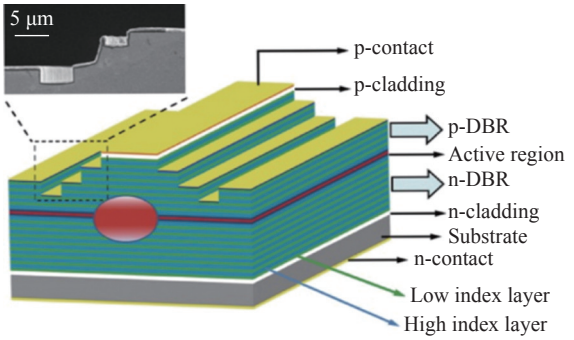

图 7　基于 LLGS 结构的布拉格反射波导激光器结构示意图

Fig. 7　Schematic diagram of bragg reflection waveguide laser with Ladder Like Groove Structure (LLGS)

斜率效率特征温度由 182 K 提高至 274 K。同时, MSBA 激光器含 95% 功率的侧向远场发散角比 BA 器件在相同注入电流下减小了 30% 以上, 侧向远场随电流的依赖性降低了 40%,侧向光束质量改善可达 36%。

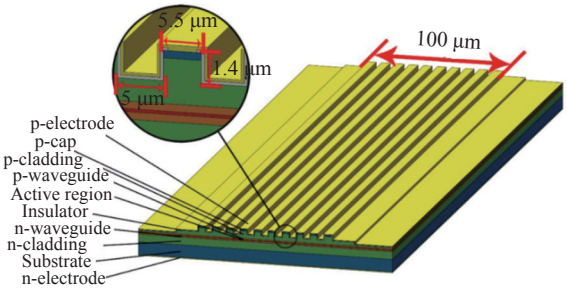

图 8　微条耦合宽区(MSBA)半导体激光器的结构示意图

Fig. 8　Schematic diagram of GaSb-based microstripe-broad-area (MSBA) lasers

3.5　倾斜腔或波导

与传统宽区结构不同, 采用倾斜等异性腔面或波导结构, 可以增大高阶模式损耗, 有利于改善侧向光束质量。

多个单位都报道了倾斜波导激光器, 其光传输方向与出射腔面具有一定的倾角, 通过调控模式反射率及载流子分布情况, 来改善器件性能。2013 年, 维也纳技术大学提出在宽区量子级联激光器采取倾斜前腔面结构, 采用聚焦离子束(FIB)加工前腔面(倾斜角 17°), 相对传统 FP 腔激光器功率提升了 60%, 并实现了近衍射极限光束质量; 采用相对解理面倾斜的波导, 可有效改善阈值电流、斜率效率及峰值功率, 但光束质量相对上述结构略差[65-66]。美国西北大学制备的 12°倾角量子级联激光器, 脉冲峰值功率可达 203 W, 侧向发散角仅为 3°, 180 W 功率时光束质量 M^2=5[67]。本课题组也提出了一种基于倾斜波导的片上合束激光器[68], 光束质量相比于传统器件提升一倍以上。

1978 年, 一种弯曲条形结构激光器被提出, 用来获得稳定的光场分布[69]。2004 年, 伊利诺伊大学报道了一种弯曲波导激光器, 通过调节波导曲率控制高阶模式的损耗, 侧向发散角得到一定改善, 但由于存在弯曲损耗会导致激光器阈值增大[70]。2012 年, 格拉斯哥大学报道一种集成 DFB 及曲型锥形放大器的结构, 获得了单侧模和纵模工作, 线宽低至 64 kHz[71]。2018 年, FBH 报道了 S 型弯曲 Y 型片上合束 DBR 激光器, 以改善空间光束特性及光束质量[72]。

α-DFB 激光器结构包含一个相对谐振腔轴倾斜一较小角度的侧向布拉格光栅, 这可稳定纵向和侧向模式, 由于只有非常小角度区间的模式可以在谐振腔内传输, 它的侧向远场发散角(含 95% 功率)通常小于 1°。2003 年, 德国 FBH 研究所制备的 1 060 nm 波长 α-DFB 激光器连续输出功率超过 1 W, 光束质量 M^2=1.1, 侧向发散角为 0.3°, 边模抑制比 SMSR=28 dB, 线宽仅为 5.8 pm[73]。此外, 中国科学院半导体所也报道了一种倾斜腔光子晶体激光器, 输出功率接近 1W, 侧向光束质量 M^2<2.5[74]。克莱姆森大学报道一种折叠腔倾斜光栅宽区半导体激光器[75], 可获得近衍射极限光束质量, 这种方法另一个优点是可节省晶圆尺寸。

3.6　谐振腔及腔面反射率调控

3.6.1　非稳谐振腔

1987 年, LANG R J 提出一种非稳谐振腔半导体激光器, 通过将腔面刻蚀为弧形, 实现对侧向模式的控制[76]。2017 年, 美国空军研究实验室采用 FIB 技术制备了基于非稳谐振腔的锑化物半导体激光器, 发射波长为 2 μm, 100 μm 条宽器件获得了~2×衍射极限光束[77]。此类器件的曲率和性能之间存在一定的关系, 其曲率越大对光束质量的改善效果越好, 与此同时输出功率也会急剧下降[78]。

3.6.2　腔面反射率调控

1996 年, 有研究者提出调控输出腔面的反射率, 来增强侧向模式分辨, 通过在输出腔面沉积侧向厚度变化的薄膜, 在低电流下实现了单模工

作[79]。2017 年，Ioffe 研究所通过在 10 μm 脊宽激光器镀完膜的腔面进行 FIB 刻蚀，去除了部分膜材料，以消除一阶侧模激射，而且器件性能并无明显退化[80-81]。采用对称腔面反射率，抑制纵向增益及温度非均匀性，可以改善光束质量[82]。

3.6.3 外腔选模结构

外腔法也是一种能够显著提升边发射半导体激光器侧向光束质量的一种手段，利用外腔反馈过滤高阶模式，从而实现侧向单模（或少模）激射以提高侧向光束质量，其缺点是需要更大的系统体积及更精确的光路装调。

1994 年加拿大拉瓦尔大学采用外腔结构对宽区半导体激光器进行了侧向模式分析，发现通过控制外腔镜与准直透镜的距离可以调控侧向模式选择性及远场发射图案[83]。2009 年，丹麦技术大学报道了离轴光谱合束 980 nm 宽区半导体激光器巴条[84]，采用 D 形锐边高反射离轴镜对模式进行选择性反馈放大，30 A 电流下功率为 9 W、侧向光束质量 M^2=6.4。

本课题组也开展了相关研究[85-87]：提出一种小角度 V 型腔光谱合束方法，采用条形平面发射镜代替传统的输出耦合镜，控制光束与高反镜交叠量，通过外腔反馈调控半导体激光光束质量，实现了光谱合束光源的光束质量优于单元器件的光束质量；采用离轴选择性反馈光谱合束方法，利用半导体激光线阵远场分立成两组侧向模式的特点，选择其中一组模式反馈回去，使其沿另一组模式方向出射，从而改善光束质量；提出基于双光阑的外腔光谱合束结构，实现高阶模式抑制；利用 V 型外腔选择性反馈方法提高了宽区半导体激光器单管的光束质量。

3.7 折射率工程

为稳定光场分布，可以采用侧向折射率调制结构，通过折射率工程来增强模式分辨及模式选择，控制模场特性来改善输出光束亮度。目前报道的结构主要为一维横向布拉格谐振（TBR）波导和二维光子晶体结构[88-91]。这两种方法采用周期性波导结构，利用光子带隙效应限制光场，从而实现大光场尺寸稳定的单模工作。目前已可实现近衍射极限光束质量、窄发散角（<1°）的激光出射。但为获得强的模式分辨，这些方法的周期性波导尺寸均在波长量级，必须采用更高精度及复杂的加工工艺，制造成本较高，而且目前器件仍面临输出功率低的问题。

3.8 集成模式过滤结构

针对宽区半导体激光器侧向多模工作、光束质量差的缺点，可以在侧向引入模式过滤结构，对高阶侧模产生更高的传输损耗，从而一定程度改善半导体激光器的光束质量。

3.8.1 分布式模式损耗

2008 年，利兹大学针对太赫兹量子级联激光器工作在高阶侧模会引起功率下降的问题，在波导结构中引入边吸收器[92]，使激光器单模工作，器件工作温度可达 168 K，为当时报道的采用 In/Au 键合工艺制备的太赫兹量子级联激光器的最高工作温度。

2013 年，FBH 提出一种侧向谐振反导引结构[93]，通过在增益条边缘引入高折射率的反导引层（Ge），由于模式耦合效应会导致高阶侧模增益的降低，制备的 90 μm 条宽激光器在 10 W 功率下侧向发散角降低了 3°。

2017 年，美国空军研究实验室提出在宽区量子级联激光器侧壁引入分布损耗[94]，在器件脊形条边墙直接沉积金属，为高阶侧模提供足够高的损耗，来实现近淡漠工作，激光器功率和斜率效率退化很小，因此可明显提升亮度。

2018 年，柏林工业大学提出了一种使用侧向非均匀波导的半导体激光器[95]，在侧壁刻蚀一列三角形微结构，增大高阶侧模的损耗，在一定电流下实现单模工作，侧向光束质量得到明显改善（M^2 从 6 下降到 2），亮度提升两倍左右。

3.8.2 边缘损耗剪裁

德国弗劳恩霍夫应用光学与精密机械研究所（IOF）提出一种相位结构以控制谐振腔内的光场[96]，在腔面附近波导中集成相位结构，增大基模的增益面积，对更高阶模式产生额外的衍射损耗，从而获得较稳定的远场并改善光束质量。

本课题组通过在锑化物中红外半导体激光器台面上刻蚀鱼骨形微光学结构[97-98]，如图 9（彩图见期刊电子版）所示，当光传输经过刻蚀沟槽会遭受额外的衍射和散射损耗。控制沟槽尺寸、深度、数量和位置可调控各阶模式的传输损耗，模式阶数越高损耗越大，从而达到降低激射模式数的目的。通过改变微结构的刻蚀深度，发现采用深刻蚀微光学结构，激光器的输出功率（1.11 W）明显高于无结构器件（0.91 W），同时侧向发散角

可改善 57%, 而且侧向发散角随电流增大速率也大幅降低。这种结构在布拉格反射波导激光器上也实现了输出功率和光束质量的双重改善[99]。

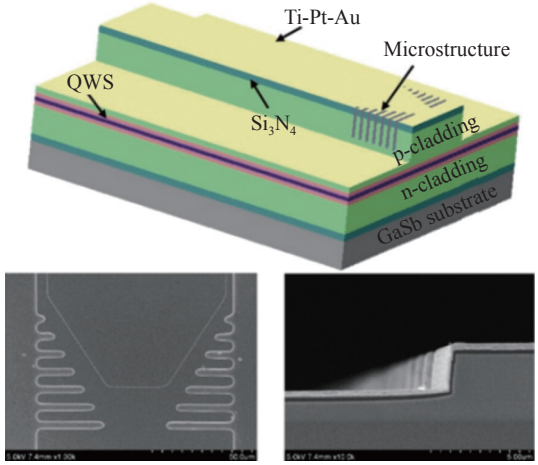

图 9　GaSb 基半导体激光器鱼骨形微光学结构示意图

Fig. 9　Schematic diagram of GaSb based diode laser with fish bone micro structures

本课题组提出在台面边缘刻蚀锯齿形微光学结构[100], 如图 10(彩图见期刊电子版)所示。通过调控锯齿微结构宽度与台面宽度的比例, 对侧模引入选择性损耗调控, 来抑制激光器侧向远场随电流增大的展宽效应。通过对比这种微结构器件与传统宽区器件的输出功率和光束质量, 发现采用微光学结构后激光器的输出功率改善了 5%, 侧向光束质量提高了 42%, 实现了功率和光束质量的双重改善。

图 10　锯齿微结构激光器的结构示意图

Fig. 10　Schematic diagram of the laser with sawtooth micro structure

针对高注入电流下侧向载流子的集聚与扩散会使半导体激光器侧向光束质量劣化的问题, 本课题组提出了复合型损耗剪裁微结构(AT), 在台面边缘刻蚀沟槽及箭头型微结构[101]。箭头型微结构阵列可以增大高阶模式损耗, 如图 11 所示。调节损耗剪裁区域宽度 $(L-D)/L$ 在 0.4~0.5 之间时, 可获得较大的低阶模式与高阶模式的损耗差异。通过载流子传输控制及损耗调控来抑制或延迟高阶侧模的出现。相对于传统宽区激光器, AT 激光器实现了更低的阈值电流(0.34 A 降到 0.24 A)、更高的输出功率(提高 21%), 同时降低了激光器束腰尺寸、远场发散角及电流依赖性, 侧向光束质量改善了 50%, 相应激光亮度得到明显提升。

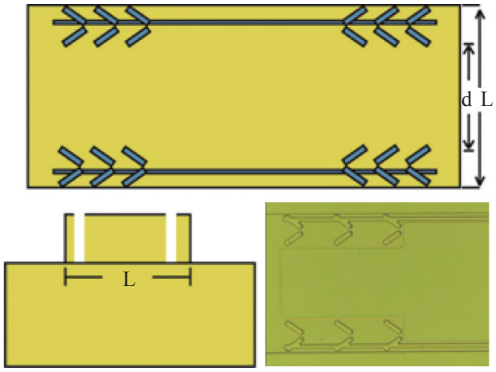

图 11　箭头型沟槽微光学结构激光器的结构示意图

Fig. 11　Schematic diagram of diode laser with arrow-trench micro structure

3.8.3　自由模式损耗调控

当前报道的激光器侧向模式的过滤结构尺寸较大, 难以对某个或某些模式进行自由调控, 基于此, 本课题组提出在半导体激光器台面上刻蚀微孔图案, 微孔的位置对应于要抑制侧向模式的波峰, 当光传输经过时会遭受衍射和散射损耗, 通过精细设计孔洞尺寸、深度、数量和位置, 使需要激射模式中心峰附近不经过孔洞, 仅在低光场强度位置经过孔洞, 从而使需要抑制的模式面临更高的传输损耗, 这种增强的模式分辨有助于降低激射模式数。本课题组制备了一系列微孔图案, 实现了可控制、稳定的光场输出, 比如可实现稳定的双光束激光输出、无注入电流依赖稳定远场、极低侧向发散角窄光束输出等, 如图 12(彩图见

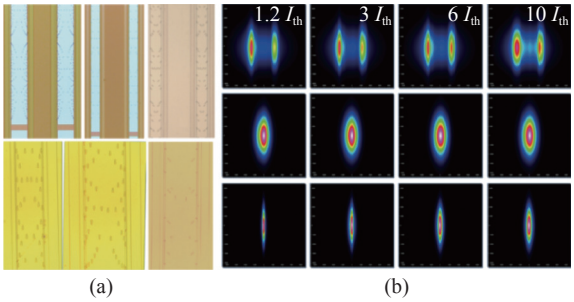

图 12　(a) 刻蚀微孔的显微镜照片及 (b) 不同的激光远场形貌

Fig. 12　(a) Micrograph of etched micro-holes and (b) different far-field patterns under various currents

期刊电子版）所示。

图 13（彩图见期刊电子版）为 100 μm 条宽半导体激光器的不同侧向模式的近场分布。从图中可以看出，基模的分布集中在宽区波导的中心，而且随着模式阶数的升高，高阶模式的分布更加分散。为改善侧向光束质量，可在高阶模式的波峰位置（图中竖线所示）设置损耗剪裁微孔结构，基模中心峰附近不经过孔洞，而高阶模光场峰值处即面临刻蚀孔洞引起的损耗，而且越靠近台面边缘经过的孔洞周期越多，相应的损耗就越大。这样就使得微结构阵列对侧向模式具有选择性，增强了基模和相对低阶的模式在模式竞争中的优势，从而达到抑制高阶模式、提高光束质量的目的。

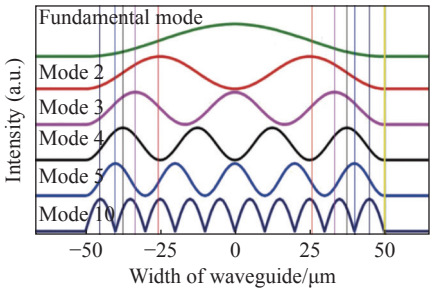

图 13 半导体激光器不同模式的近场分布及损耗剪裁位置

Fig. 13 Calculated near-field profiles of the lateral modes with different orders and the loss tailoring placement

本课题通过采用三角形微孔结构[22]，如图 14（彩图见期刊电子版）所示，在高阶侧模除中心位置的波峰处设置微孔，其数量由中心向两边递增。当光传输经过微孔结构时，除 1 阶侧模（基模）外，高阶侧模的光强均得到明显减少，表明侧向模式分辨得到加强。由于高阶侧模被抑制，模式竞争减小，引入微孔结构后激光器的输出功率无明显降低，激射光谱明显变窄，同时侧向光束质量相对传统宽区器件得到明显改善，最高可提升 2.4 倍，激光亮度最高可提升两倍以上。在大电流下的光束质量改善效果变差主要由于工作电流增大热透镜效应引起模式收缩与剪裁结构不匹配引起的，可根据实际工作电流下激光器近场分布进行损耗剪裁微结构的优化排布。

本课题组还选取了多种微光学结构进行了流片及测试（激光器条宽和腔长分别为 100 μm 和 4 mm），发现器件的输出功率与传统宽区激光器接近，部分结构可改善功率特性，如图 15（彩图见期刊电子版）所示。进行初期高温高功率老化测试，发现部分结构会引起器件可靠性的下降，而有的结构可展示较好的可靠性。进一步将增大样品数量、老化测试时长及系统探索器件失效机理，为高功率、高可靠性微结构激光器提供参考。

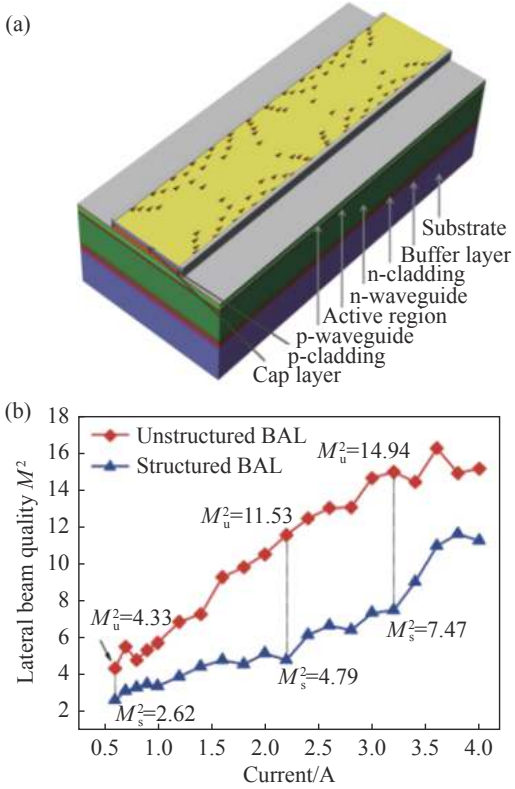

图 14 (a) 损耗调控宽区半导体激光器结构示意图；(b) 测得的有结构器件和传统宽区结构器件在不同电流下的侧向光束质量对比

Fig. 14 (a) Schematic diagram of the loss tailoring BAL; (b)measured lateral beam quality of the structured and unstructured BALs at different currents

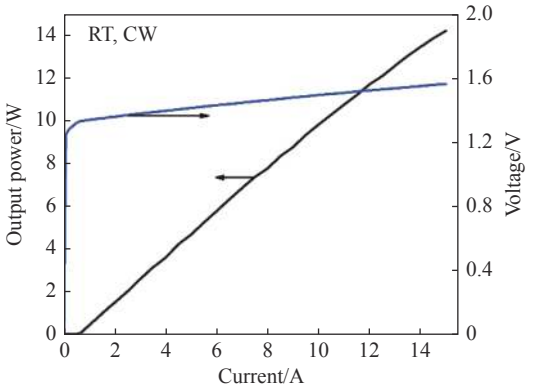

图 15 微结构激光器在室温连续工作下的功率-电流-电压特性曲线

Fig. 15 Measured power-current-voltage characteristics of diode lasers with microstructures

4　结　论

高功率半导体激光器在加工、传感及国防等领域具有重大需求，但受侧向光束质量差、亮度低的制约难以直接应用。宽区半导体激光器虽然容易实现高的输出功率和转换效率，但其在高注入电流下各阶侧模间的增益差很小，模式分辨很差，导致激射侧模数增大，引起侧向远场展宽及光束质量退化。究其原因，主要在于半导体激光器的侧向模式受多种物理效应的影响，共同导致侧向光束质量严重退化。然而，当前相关的半导体激光器仿真模型尚不健全，其在空间三个维度及时间跨度存在数量级的差异，难以精确揭示各效应作用机制及其在侧向光束质量退化中发挥的作用，因此目前主要结合实验结果进行逐一研究。根据当前理论和实验研究结果，热致折射率改变及载流子集聚效应是侧向光束质量在大电流下退化的主要因素，但难以准确判断定单一效应的占比，因为它与激光器设计 (垂直外延结构、侧向-纵向结构) 密切相关，而且之间互相依赖。半导体激光器的远场由谐振腔内模式及近场光场分布决定，研究者们针对各种物理效应进行激光器结构优化，通过调控热分布及载流子注入、采用模式过滤结构等，增强侧向模式增益损耗分辨，一定程度上抑制了激射模式数的增加及实现光束质量的改善，但多数结构面临功率衰减明显、难以获得极高光束质量的难题。半导体激光在提升光束质量的同时必须保持足够高的输出功率及转换效率，这样才可能具有竞争力。因此，需要在激光器三个维度针对各种物理效应进行协同优化设计，有效进行侧向模式调控，解决了激光器输出功率与光束质量间的矛盾，可在保证输出高功率、高效率激光束的前提下实现稳定的、近衍射极限光束质量的激光输出，有望从芯片层次提高半导体激光器及合束光源的亮度，降低其应用成本及发展新的应用，产生重要的社会和经济效益。

参考文献:

[1] PIETRZAK A, ZORN M, HUELSEWEDE R, *et al*.. Development of highly efficient laser diodes emitting around 1060nm for medical and industrial applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10900: 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 Processing Magazine*, 2020, 37(4): 50-61.

[3] STRATEGIES UNLIMITED. The worldwide market for lasers: market review and forecast 2020[R]. Nashville, TN: Endeavor Business Media, 2020. https://store.strategies-u.com/products/the-worldwide-market-for-lasers-market-review-and-forecast-2020.html

[4] BAUMANN M, BALCK A, MALCHUS J, *et al*.. 1000 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10900: 1090005.

[5] SKIDMORE J. Semiconductor lasers for 3-D sensing[J]. *Optics and Photonics News*, 2019, 30(2): 26-33.

[6] SCHLEUNING D, DROZ P Y. Lidar sensors for autonomous driving[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620D.

[7] WENZEL H, CRUMP P, PIETRZAK A, *et al*.. Theoretical and experimental investigations of the limits to the maximum output power of laser diodes[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12: 085007.

[8] YAMAGATA Y, KAIFUCHI Y, NOGAWA R, *et al*.. Highly efficient 9xx-nm band single emitter laser diodes optimized for high output power operation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 1126203.

[9] CRUMP P, TRÄNKLE G. A brief history of kilowatt-class diode-laser bars[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11301: 113011D.

[10] HUANG R K, CHANN B, BURGESS J, *et al*.. Teradiode's high brightness semiconductor lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 97300C.

[11] ZHU H B, LIN X CH, ZHANG Y W, *et al*.. kW-class fiber-coupled diode laser source based on dense spectral multiplexing of an ultra-narrow channel spacing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24723-24733.

[12] ALBRODT P, JAMAL M T, HANSEN A K, *et al*.. Coherent combining of high brightness tapered amplifiers for efficient non-linear conversion[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 928-937.

[13] CRUMP P, BÖLDICKE S, SCHULTZ C M, *et al*.. Experimental and theoretical analysis of the dominant lateral

waveguiding mechanism in 975 nm high power broad area diode lasers[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, 27(4): 045001.

[14] WINTERFELDT M, CRUMP P, WENZEL H, *et al*.. Experimental investigation of factors limiting slow axis beam quality in 9xx nm high power broad area diode lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(6): 063103.

[15] CRUMP P, ELATTAR M, MIAH J, *et al*.. Experimental studies into the beam parameter product of GaAs high-power diode lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(1): 1501111.

[16] ZHOU K, DU W CH, YANG X, *et al*.. Effect of lateral index step on the performance of high-power broad-area 970-nm diode lasers based a large-optical-cavity waveguide structure[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11333: 113330X.

[17] RIEPRICH J, WINTERFELDT M, KERNKE R, *et al*.. Chip-carrier thermal barrier and its impact on lateral thermal lens profile and beam parameter product in high power broad area lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(12): 125703.

[18] WINTERFELDT M, CRUMP P, KNIGGE S, *et al*.. High beam quality in broad area lasers via suppression of lateral carrier accumulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(17): 1809-1812.

[19] HOLLY C, LIU X H, HEINEMANN S, *et al*. . Influence of lateral refractive index profiles on the divergence angle of gain-guided broad-area laser diode bars[C]. *2018 IEEE Photonics Conference (IPC)*, IEEE, 2018: 1-2.

[20] RAUCH S, WENZE H, RADZIUNAS M, *et al*.. Impact of longitudinal refractive index change on the near-field width of high-power broad-area diode lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(26): 263504.

[21] WINTERFELDT M, RIEPRICH J, KNIGGE S, *et al*.. Assessing the influence of the vertical epitaxial layer design on the lateral beam quality of high-power broad area diode lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9733: 97330O.

[22] WANG L J, TONG C ZH, SHU SH L, *et al*.. Loss tailoring of high-power broad-area diode lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(14): 3562-3565.

[23] CRUMP P, WINTERFELDT M, DECKER J, *et al*.. Novel approaches to increasing the brightness of broad area lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9767: 97671L.

[24] BONI A, ARSLAN S, ERBERT G, *et al*.. Epitaxial design progress for high power, efficiency, and brightness in 970 nm broad area lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11668: 1166807.

[25] MIAH J, KALOSHA V P, BIMBERG D, *et al*.. Astigmatism-free high-brightness 1060 nm edge-emitting lasers with narrow circular beam profile[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30514-30522.

[26] ZHAO SH 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]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3518-3526.

[27] SMITH G M, DONNELLY J P, MISSAGGIA L J, *et al*.. Slab-coupled optical waveguide lasers and amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8241: 82410S.

[28] KOESTER J P, PUTZ A, WENZEL H, *et al*.. Mode competition in broad-ridge-waveguide lasers[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2021, 36(1): 015014.

[29] DECKER J, WINTERFELDT M, FRICKE J, *et al*. . Study of lateral brightness in 20 μm to 50 μm wide narrow stripe broad area lasers[C]. *2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD)*, IEEE, 2015: 21-22.

[30] WILKENS M, WENZEL H, FRICKE J, *et al*.. High-efficiency broad-ridge waveguide lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(6): 545-548.

[31] KNIGGE A, KLEHR A, WENZEL H, *et al*.. Wavelength-stabilized high-pulse-power laser diodes for automotive LiDAR[J]. *Physica Status Solidi*, 2018, 215(8): 1700439.

[32] WANG L J, LI ZH, TONG C ZH, *et al*.. Near-diffraction-limited Bragg reflection waveguide lasers[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(34): F15-F21.

[33] PASCHKE K, BLUME G, WENZEL H, *et al*.. 635 nm tapered diode lasers with more than 2000 h operation at 500 mW output power[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12024: 120240A.

[34] SUMPF B, THEURER L S, MAIWALD M, *et al*.. 783 nm wavelength stabilized DBR tapered diode lasers with a 7 W output power[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(18): 5418-5423.

[35] DITTMAR F, SUMPF B, FRICKE J, *et al*.. High-power 808-nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of M^2 = 1.9 at P = 4.4 W[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(4): 601-603.

[36] DITTMAR F, KLEHR A, SUMPF B, *et al*.. 9-W output power from an 808-nm tapered diode laser in pulse mode operation with nearly diffraction-limited beam quality[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*,

2007, 13(5): 1194-1199.

[37] SUMPF B, HASLER K H, ADAMIEC P, *et al*.. High-brightness quantum well tapered lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 1009-1020.

[38] MÜLLER A, ZINK C, FRICKE J, *et al*.. Efficient, high brightness 1030 nm DBR tapered diode lasers with optimized lateral layout[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(6): 1501107.

[39] MÜLLER A, ZINK C, FRICKE J, *et al*.. 1030nm DBR tapered diode laser with up to 16 W of optical output power[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10123: 101231B.

[40] SUMPF B, HASLER X H, ADAMIEC P, *et al*. . 12.2 W output power from 1060 nm DBR tapered lasers with narrow spectral line width and nearly diffraction limited beam quality[C]. *CLEO/Europe-EQEC 2009-European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference*, IEEE, 2009: 1.

[41] AHO A T, VIHERIÄLÄ J, KOSKINEN M, *et al*.. High-power 1.5 μm tapered distributed Bragg reflector laser diodes for eye-safe LIDAR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(19): 1249-1252.

[42] PFAHLER C, KAUFEL G, KELEMEN M T, *et al*.. GaSb-based tapered diode lasers at 1.93 μm with 1.5-W nearly diffraction-limited power[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(6): 758-760.

[43] GÖKDEN B, MANSURIPUR T S, BLANCHARD R, *et al*.. High-brightness tapered quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(5): 053503.

[44] SCHWERTFEGER S, WIEDMANN J, SUMPF B, *et al*.. 7.4 W continuous-wave output power of master oscillator power amplifier system at 1083 nm[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(6): 346-347.

[45] WENZEL H, PASCHKE K, BROX O, *et al*.. 10 W continuous-wave monolithically integrated master-oscillator power-amplifier[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(3): 160-162.

[46] ZINK C, MAAßDORF A, FRICKE J, *et al*.. Monolithic master oscillator tilted tapered power amplifier emitting 9.5 W at 1060 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(1): 59-62.

[47] VU T N, TIEN T Q, SUMPF B, *et al*.. 16.3 W peak-power pulsed all-diode laser based multi-wavelength master-oscillator power-amplifier system at 964 nm[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8608.

[48] WILKENS M, ERBERT G, WENZEL H, *et al*.. Highly efficient high-brightness 970-nm ridge waveguide lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(7): 406-409.

[49] ZEGHUZI A, CHRISTOPHER H, KLEHR A, *et al*.. High-brightness nanosecond-pulse operation from tapered-ridge-waveguide lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(3): 151-154.

[50] HOHIMER J P, HADLEY G R, OWYOUNG A. Mode control in broad-area diode lasers by thermally induced lateral index tailoring[J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(4): 260-262.

[51] BAI J G, LEISHER P, ZHANG SH G, *et al*.. Mitigation of thermal lensing effect as a brightness limitation of high-power broad area diode lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7953: 79531F.

[52] KIM Y, YANG J T, CHOI W Y. High-power broad-area laser diode performance improvement with a double pedestal structure[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(4): 042004.

[53] KIM Y, SUNG Y, YANG J T, *et al*.. Numerical analysis of high-power broad-area laser diode with improved heat sinking structure using epitaxial liftoff technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10514: 105140C.

[54] ZEGHUZI A, RADZIUNAS M, WÜNSCHE H J, *et al*.. Traveling wave analysis of non-thermal far-field blooming in high-power broad-area lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 55(2): 2000207.

[55] CASA P D, MARTIN D, MAAßDORF A, *et al*.. High power broad-area lasers with buried implantation for current confinement[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2019, 34(10): 105005.

[56] ELATTAR M, BROX O, CASA P D, *et al*.. High-brightness broad-area diode lasers with enhanced self-aligned lateral structure[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2020, 35(9): 095011.

[57] LINDSEY C, DERRY P, YARIV A. Fundamental lateral mode oscillation via gain tailoring in broad area semiconductor lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 47(6): 560-562.

[58] MALĄG A, SOBCZAK G, DĄBROWSKA E, *et al*.. Emitted beam stabilization in junction plane by lateral periodic structure in laser diodes emitting at 980 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10974: 1097404.

[59] SHEEM S K, VOJAK B A. Broad-area semiconductor lasers with gain-length variation for lateral mode control: the bow-tie geometry laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 63(1): 248-250.

[60] BO B X, GAO X, WANG L, *et al*.. Rhombus-like stripe BA InGaAs-AlGaAs-GaAs lasers[J]. *IEEE Photonics*

Technology Letters, 2004, 16(5): 1248-1249.

[61] WANG T, TONG C ZH, WANG L J, *et al*.. Injection-insensitive lateral divergence in broad-area diode lasers achieved by spatial current modulation[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(11): 112102.

[62] WANG T, WANG L J, SHU SH L, *et al*.. Suppression of far-field blooming in high-power broad-area diode lasers by optimizing gain distribution[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(7): 071404.

[63] WANG T, WANG L J, SHU SH L, *et al*.. Beam control of high-power broad-area photonic crystal lasers using ladderlike groove structure[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(6): 062701.

[64] LU Z F, WANG L J, ZHANG Y, *et al*.. High-power GaSb-based microstripe broad-area lasers[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(3): 032702.

[65] AHN S, SCHWARZER C, ZEDERBAUER T, *et al*.. High-power, low-lateral divergence broad area quantum cascade lasers with a tilted front facet[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 051101.

[66] AHN S, SCHWARZER C, ZEDERBAUER T, *et al*.. Enhanced light output power of quantum cascade lasers from a tilted front facet[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15869-15877.

[67] HEYDARI D, BAI Y, BANDYOPADHYAY N, *et al*.. High brightness angled cavity quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 091105.

[68] LU Z F, WANG L J, ZHAO ZH D, *et al*.. Broad-area laser diodes with on-chip combined angled cavity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(8): 081402.

[69] SCIFRES D R, STREIFER W, BURNHAM R D. Curved stripe GaAs: GaAlAs diode lasers and waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(4): 231-234.

[70] SWINT R B, YEOH T S, ELARDE V C, *et al*.. Curved waveguides for spatial mode filters in semiconductor lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(1): 12-14.

[71] HOU L P, HAJI M, AKBAR J, *et al*.. Narrow linewidth laterally coupled 1.55 μm AlGaInAs/InP distributed feedback lasers integrated with a curved tapered semiconductor optical amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4525-4527.

[72] TAWFIEQ M, FRICKE J, MÜLLER A, *et al*.. Characterisation and comparison between different S-bend shaped GaAs Y-branch distributed Bragg reflector lasers emitting at 976 nm[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2018, 33(11): 115001.

[73] FRICKE J, MATALLA M, PASCHKE K, *et al*.. Fabricating and testing of Bragg gratings for 1060-nm α-DFB lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4947: 223-231.

[74] LIU Y, WANG Y F, QU H W, *et al*.. Angled cavity photonic crystal lasers with asymmetrical high-order surface gratings[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(3): 032701.

[75] ZHAO Y S, ZHU L. Folded cavity angled-grating broad-area lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 24087-24092.

[76] LANG R J, MITTELSTEIN M, YARIV A, *et al*.. Unstable resonator semiconductor lasers. Part 1: theory[J]. *IEE Proceedings J* (*Optoelectronics*), 1987, 134(1): 69-75.

[77] YANG C, PAXTON A H, NEWELL T C, *et al*.. On-chip unstable resonator cavity GaSb-based quantum well lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(14): 143101.

[78] BIELLAK S A, FANNING C G, SUN Y, *et al*.. Reactive-ion-etched diffraction-limited unstable resonator semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(2): 219-230.

[79] STRYCKMAN D, ROUSSEAU G, D'AUTEUIL M, *et al*.. Improvement of the lateral-mode discrimination of broad-area diode lasers with a profiled reflectivity output facet[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(30): 5955-5959.

[80] PAYUSOV A, SERIN A, MUKHIN I, *et al*.. Lateral mode control in edge-emitting lasers with modified mirrors[J]. *Journal of Physics*:*Conference Series*, 2017, 917(5): 052035.

[81] GORDEEV N Y, PAYUSOV A S, MUKHIN I S, *et al*.. Lateral mode discrimination in edge-emitting lasers with spatially modulated facet reflectance[J]. *Semiconductors*, 2019, 53(2): 200-204.

[82] RAUCH S, MODAK P, HOLLY C, *et al*. . Beam quality improvement of broad-area laser diodes by symmetric facet reflectivities[C]. *2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, IEEE, 2018: 1-2.

[83] MAILHOT S, CHAMPAGNE Y, DOYON B, *et al*.. Lateral mode analysis of a broad-area laser operated with an external cavity[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2041: 432-443.

[84] VIJAYAKUMAR D, JENSEN O B, THESTRUP B. 980 nm high brightness external cavity broad area diode laser bar[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5684-5690.

[85] ZHAO Y F, SUN F Y, TONG C ZH, *et al*.. Going beyond the beam quality limit of spectral beam combining of diode lasers in a V-shaped external cavity[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14058-14065.

[86] SUN F Y, SHU SH L, ZHAO Y F, *et al*.. High-brightness diode lasers obtained via off-axis spectral beam combining with selective feedback[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21813-21818.

[87] SUN F Y, ZHAO Y F, SHU SH L, *et al*.. High beam quality broad-area diode lasers by spectral beam combining with double filters[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 011401.

[88] CHOI J M, ZHU L, GREEN W M J, *et al*.. Large-area, semiconductor transverse bragg resonance (TBR) lasers for efficient, high power operation[J]. *ICALEO*, 2005, 2005: 406.

[89] ZHU L, CHOI J M, DEROSE G A, *et al*.. Electrically pumped two-dimensional Bragg grating lasers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1863-1865.

[90] ZHU L, CHAK P, POON J K S, *et al*.. Electrically-pumped, broad-area, single-mode photonic crystal lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5966-5975.

[91] ZHU Y Y, ZHAO Y S, ZHU L. Two-dimensional photonic crystal Bragg lasers with triangular lattice for monolithic coherent beam combining[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10610.

[92] FAN J A, BELKIN M A, CAPASSO F, *et al*.. Wide-ridge metal-metal terahertz quantum cascade lasers with high-order lateral mode suppression[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(3): 031106.

[93] WENZEL H, CRUMP P, FRICKE J, *et al*.. Suppression of higher-order lateral modes in broad-area diode lasers by resonant anti-guiding[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(12): 1102-1108.

[94] KASPI R, LUONG S, BATE T, *et al*.. Distributed loss method to suppress high order modes in broad area quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(20): 201109.

[95] MIAH M J, STROHMAIER S, URBAN G, *et al*.. Beam quality improvement of high-power semiconductor lasers using laterally inhomogeneous waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(22): 221107.

[96] ECKSTEIN H C, ZEITNER U D, TÜNNERMANN A, *et al*.. Mode shaping in semiconductor broad area lasers by monolithically integrated phase structures[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4480-4482.

[97] RONG J M, XING E B, ZHANG Y, *et al*.. Low lateral divergence 2 μm InGaSb/ AlGaAsSb broad-area quantum well lasers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7246-7252.

[98] XING E B, RONG J M, ZHANG Y, *et al*.. Watt-class low divergence 2 μm GaSb based broad-area quantum well lasers[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(3): 280-283.

[99] RONG J M, XING E B, WANG L J, *et al*.. Control of lateral divergence in high-power, broad-area photonic crystal lasers[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(7): 072104.

[100] SU J X, TONG C ZH, WANG L J, *et al*.. Selective loss tailoring of broad-area diode lasers[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(2): 020901.

[101] SU J X, TONG C ZH, WANG L J, *et al*.. Beam waist shrinkage of high-power broad-area diode lasers by mode tailoring[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13131-13140.

作者简介：

汪丽杰(1985—)，男，河北石家庄人，副研究员，硕士生导师，2013 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事高亮度半导体激光方面的研究。E-mail: wanglijie@ciomp.ac.cn

佟存柱(1976—)，男，吉林伊通人，研究员，博士生导师，2005 年于中国科学院半导体研究所获得博士学位，主要从事半导体激光方面的研究。E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn