

激光与光电子学进展

大功率半导体激光器光束质量的研究与进展

陈芬, 崔碧峰*, 冯靖宇, 郑翔瑞, 陈中标

北京工业大学信息学部光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 半导体激光器作为一种理想的激光光源, 具有广阔的发展前景。在激光雷达、光泵浦、光纤耦合等领域, 对半导体激光器的要求除大功率以外, 还需具有高光束质量。由于大功率半导体激光器自身的结构特点, 侧向易出现多模态光束, 严重影响侧向光束质量。因此对大功率半导体激光器侧向模式进行控制, 改善侧向光束质量, 已成为行业内的研究热点。从 3 个部分展开: 锥形激光器、宽脊波导半导体激光器光束质量控制、半导体激光器散热封装结构, 分类介绍了当前国内外在控制侧向光束质量方面具有代表性的研究成果与进展。

关键词 激光器; 半导体激光器; 侧向光束质量; 侧模控制

中图分类号 TN365

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222510

Research and Progress of High-Power Semiconductor Lasers with High Beam Quality

Chen Fen, Cui Bifeng*, Feng Jingyu, Zheng Xiangrui, Chen Zhongbiao

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology of Ministry of Education, Faculty of Information Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Semiconductor lasers can be applied as ideal laser sources toward the development of laser and sensing technologies. For laser radar measurement, optical pumping, and fiber coupling, semiconductor lasers must have high power and high beam quality. The design of high-power semiconductor lasers promotes the easy production of multi-mode beams in the lateral direction, which decreases the lateral beam quality. Hence, the limitations induced by the lateral mode and the enhancement of the lateral beam quality of high-power semiconductor lasers have become important research topics. This paper focuses on three topics: the tapered laser, the method for the improvement of the lateral beam quality of a broad-area semiconductor laser, and the package structure of a semiconductor laser. Furthermore, the results and progress of domestic and international research on the control of the lateral beam quality are reviewed.

Key words diode laser; semiconductor laser; lateral beam quality; lateral mode control method

1 引言

半导体激光器具有体积小、效率高、波长范围广等诸多优势, 应用范围非常广泛。早期对半导体激光器的研究主要集中在提高输出功率水平, 如: 提升单管功率、一维集成线阵、二维集成叠阵。随着其应用范围的扩大, 在激光雷达、光泵浦、光纤耦合等领域^[1-3], 对激光光源的要求除大功率以外, 还需具有较好的光束质量。因此, 光束质量也成为半导体激光器领域的研究热点。

提高半导体激光单管输出功率最主要的方法是增

加器件的有效增益面积, 因此, 在同等腔长条件下, 宽脊波导结构被广泛运用于大功率半导体激光器的制备^[4-5]。但是这种结构在获得高输出功率的同时, 对光束质量的影响也很明显, 主要有两点: 1) 当工作电流较高时, 激光器会产生高阶侧向模式, 导致器件侧向发散角变大, 同时还会产生虚光腰, 导致激光光斑发生跳动现象, 严重降低器件侧向光束质量; 2) 随着电流的注入, 器件会出现局部过热现象, 这会严重影响器件长期使用的可靠性, 更会影响其侧向光束质量。

由此可见, 对半导体激光器而言, 大功率和高光束质量通常是相互矛盾的, 因此, 对光束质量的控制, 尤

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2022-10-22; 录用日期: 2022-10-27; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(11204009)、北京市自然科学基金(4142005, 4182014)、北京市科技计划(KM201810005025)

通信作者: *cbf@bjut.edu.cn

其是对侧向进行模式控制,是研究中亟待解决的问题。

从器件结构及封装结构出发,本文梳理了当前半导体激光器侧向光束质量控制方面的研究与进展,主要涉及 3 个方面:1) 兼具大功率和高光束质量的锥形激光器;2) 宽脊波导半导体激光器的侧向光束质量控制;3) 改善大功率半导体激光器光束质量的封装结构。

2 锥形激光器

为解决宽脊波导结构带来的大功率与光束质量差的矛盾,主振荡功率放大器(MOPA)应运而生,这种激光器的振荡源(MO)部分能产生高质量单模种子光,放大器部分(PA)能对种子光进行放大,输出功率高且能够保持好的光束质量。当两部分集成在一块芯片上,整块芯片均作为激光谐振腔时,就是锥形激光器^[6],其结构如图 1 所示。

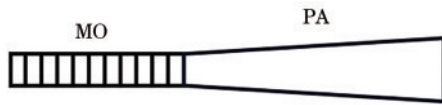


图 1 锥形激光器结构图

Fig. 1 Structural diagram of tapered laser

1993 年,美国麻省理工学院 Walpole 等^[7]公开报道了第一只锥形激光器,该器件获得了 4.2 W 的高功率输出和近衍射极限的高质量光束,并将其用于自由空间光通信。此后,研究人员对锥形激光器开展了诸多研究,按器件结构大致可分为:标准结构锥形激光器、分布布拉格反射(DBR)光栅结构锥形激光器。

2.1 标准结构锥形激光器

锥形激光器脊形区的宽度,关乎其产生的种子源

激光的光束质量,需要根据一阶侧模截止条件对脊形区的宽度进行合理的设计,一阶侧模截止所需脊形宽度 w 可表示为

$$w = \lambda_0 \left(2\sqrt{n_2^2 - n_1^2} \right), \quad (1)$$

式中: λ_0 为波长; n_2 为脊波导部分的有效折射率; n_1 为脊波导两侧的有效折射率,有效折射率 n_1 、 n_2 取决于外延层材料和刻蚀深度。为保证产生单侧模、高质量的种子源激光,脊形区的宽度和刻蚀深度需要根据实际应用需求、外延结构和工艺难度进行合理选择,对常见的 GaAs 基半导体激光器而言,其一阶侧模截止宽度在 3~6 μm 之间。

由此看来,为了保证产生单侧模种子源激光,脊形区宽度通常设计得较窄,因此其增益面积也较小。由于脊形区和锥形区的增益面积不一样,所需的注入电流也不一样。据此,研究人员提出了分离电极的注入形式^[8-10],即对脊形区和锥形区分别进行电流调控。

2005 年,德国 Ferdinand-Braun-Institut^[8] 制备了 980 nm 的分离电极锥形激光器,其结构如图 2 所示,在此基础上,通过对分离电极器件脊形区和锥形区的电阻值进行测量,来探究标准单一电极器件内部的电流分配情况。结果表明:对单一电极器件而言,流入两部分的电流占比分别约为 5%、95%,随着电流的不断注入,流入脊形区的电流也增加,导致高阶侧模激射,种子源光束质量下降,最终表现为侧向光束质量因子 (M^2) 恶化。同时,高电流、高功率条件下的非线性效应^[11]也影响了器件侧向光束质量。相比之下,采用分离电极注入的方式,可以实现对两部分电流的分别调控,随着输出功率的增加, M^2 变化幅度相对较小。

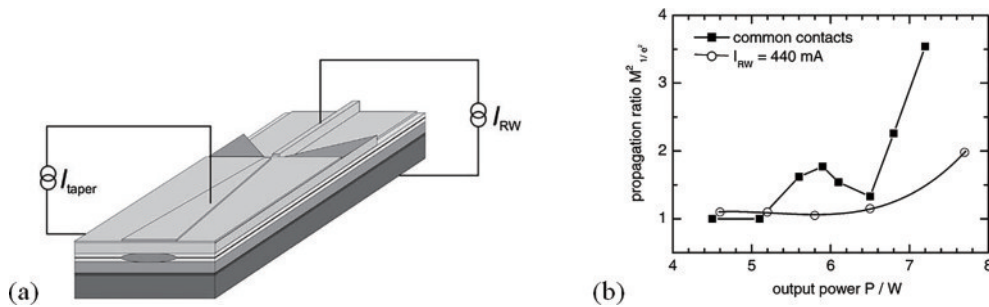


图 2 980 nm 分离电极锥形激光器^[8]。(a) 结构图; (b) 不同输出功率下的 M^2

Fig. 2 980 nm tapered laser with separated contacts^[8]. (a) Structural diagram; (b) M^2 under different output powers

2007 年,中国科学院半导体研究所李璟等^[12]制备了国内第一支分离电极锥形激光器,其最大输出功率与单一电极器件基本一致,但当输出功率超过 1.5 W 后,单一电极器件的 M^2 变化幅度较大,而分离电极器件的 M^2 变化较为缓慢,有效地证明了分离电极相比单一电极而言,在高功率条件下稳定性更好、对光束质量影响更小。

分离电极结构解决了脊形区和锥形区不同电流注入的问题,但带来的光耦合问题也不容忽视。2020—

2021 年,中国科学院半导体研究所曼玉选等^[13-14]在优化外延结构的基础上,制备了一种 975 nm 的分离电极锥形激光器,并在脊形区与锥形区的耦合区域内刻蚀了抗反射沟槽,以避免电流非注入区域形成 F-P 腔,进而避免了高阶侧模反射回脊形谐振腔内破坏基侧模特性。在脊形区、锥形区注入电流分别为 400 mA、7 A 的条件下,器件获得 6.4 W 的输出功率,侧向 M^2 为 1.66,亮度达到 369 $\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。

优化外延层结构,也是保证脊形区产生高质量种

子源激光的方式之一。有研究表明^[15],使用较低模式增益(光限制因子 Γ 低于2%)的外延层结构,能够有效抑制非线性效应并改善光束质量。2013年,Wang等^[16]制备了一种具有超大光波导、 $\Gamma=1\%$ 的锥形激光器,输出功率可达30 W,衍射极限功率提高了50%,光束中心瓣的侧向 M^2 低至1.9。

在较低的模式增益条件下,为进一步探究有源区结构对光模式的影响,2017年,孙胜明等^[17]模拟分析了单、双量子阱结构锥形激光器的光束特性。研究表明:当 $\Gamma=2\%$ 时,与传统的单量子阱(SQW)结构器件相比,经过优化设计的非对称双量子阱(ADQW)结构器件的基侧模能量分布更为集中,如图3所示。种子源光束耦合进锥形区的基侧模衍射分布也更为均匀,器件输出功率由2.76 W提升至3.67 W,并具有稳定的电光转换效率。由此可见,为同时保证较好的侧向光束质量和较高的基侧模能量,在有源区的选择上,可使用低模式增益的双量子阱结构。

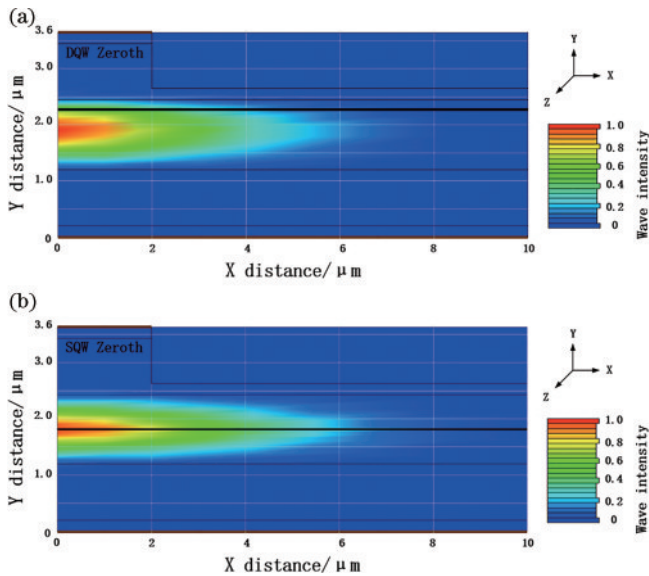


图3 不同量子阱结构激光器的基侧模光强度分布^[17]。(a)双量子阱结构;(b)单量子阱结构

Fig. 3 Fundamental lateral mode intensity of the two lasers^[17]. (a) ADQW structure; (b) SQW structure

脊形区的宽度较窄,增益面积也较小,因此对锥形激光器而言,锥形区的设计关乎其对种子源功率的放大水平,同时也会影响器件的侧向光束质量。早期研究表明,为了保证种子源光束单侧模传输,锥角需要小于等于单侧模的自由衍射角,这样能有效避免基侧模能量耦合进高阶模或辐射模^[18]。2017年,Huang等^[19]对比研究了锥角度数为 0° 、 1° 、 3° 、 6° 的锥形激光器,结果表明:在相同窄脊宽度、相同腔长条件下,对 1° 锥角器件而言,种子源光束以单侧模形式传输进入锥形区,且其衍射强度分布较为平缓,所以光斑模式最为稳定,也具有较好的侧向发散角;对 6° 锥角器件而言,由于其具有较大的增益面积,种子光在该器件中具有较大的增益特性,因此

相比小角度器件,输出功率可达到更高的水平。

2021年,王芝浩等^[20]定性探究了锥角度数对锥形激光器激射阈值的影响,研究发现,随锥角度数的增大,有效注入面积变大,器件的波导损耗和阈值增益均变大,因此相对小角度器件而言,大角度器件具有较大的阈值电流和较低的斜率效率;同时,大角度器件具有较宽的出光端面,在一定程度上可以避免腔面灾变性光学损伤(COMD)的发生。

由此看来,较小的锥角能够保证良好的侧向光束质量,较大的锥角可以获得较大的增益特性,也可以提升器件抗COMD水平,但较大锥角带来的阈值电流增大和斜率效率下降的问题也不容忽视。因此,在设计锥形激光器时,其锥角大小应在合理范围内选择,以兼顾输出水平、阈值与效率。

2.2 分布布拉格反射锥形激光器

DBR光栅在半导体激光器中发挥着举足轻重的作用,作为一种光学元件,DBR光栅一方面可起到反射器作用,效果类似于法布里-玻罗(F-P)腔的一个端面反射镜;另一方面其具有过滤纵模和压窄纵模宽度的优势。因此,研究人员也开始将其耦合进锥形激光器中,探究DBR光栅所具备的反射器的效果对侧向光束质量的影响机理。

2014年,英国诺丁汉大学研究团队^[21]从理论角度探讨了DBR光栅对侧向模式的优化作用。通过对比分析DBR锥形激光器与标准锥形激光器的光场图发现,标准器件的旁瓣明显且强度较高。为定性探究其原因,又分析了2种器件谐振腔窄脊端面处的光子分布,如图4所示。由图4可知,具有DBR光栅的端面,只对窄脊谐振腔内的种子源光束进行反射;而标准器件的端面,还反射了窄脊区域以外产生的光子,最终体现为产生旁瓣,影响侧向光束质量。

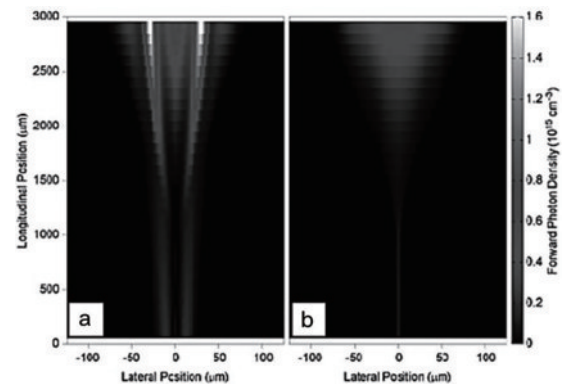


图4 窄脊端面处光子分布^[21]。(a)标准锥形激光器;(b)DBR锥形激光器

Fig. 4 Photon distribution at the end face of narrow ridge^[21].

(a) Standard tapered laser; (b) DBR tapered laser

2016年,Müller等^[22]采用超大光腔的外延层结构,同时对DBR光栅结构进行优化,改变了光栅条纹的反射率,进一步降低了脊形区域以外的高阶侧模反

射回谐振腔内对种子源光束产生的影响。经测试,制备的 1030 nm 激光器在输出功率为 10.5 W 时,中心光斑功率为 8.1 W,光束质量近衍射极限,亮度为 $700 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。该器件在输出功率、光束质量方面表现优异,充分证明了 DBR 光栅与锥形激光器相结合的优势。

制备光栅条纹对工艺水平要求较高,而表面光栅结构的制备通常需要二次光刻,容易导致器件的结构、精

度与预期目标产生较大的偏差。2014 年, Liu 等^[23] 制备了一种侧向光栅结构锥形激光器, 器件结构及效果如图 5 所示。该器件的波导和侧向光栅是通过一次标准光刻工艺和干法刻蚀工艺制备而成的, 连续输出功率接近 600 mW, 在不同输出功率条件下侧向发散角始终低于 3° 。这种侧向 DBR 结构, 在保证过滤纵模固有的优势以外, 对光束侧向发散角的改善作用也十分显著。

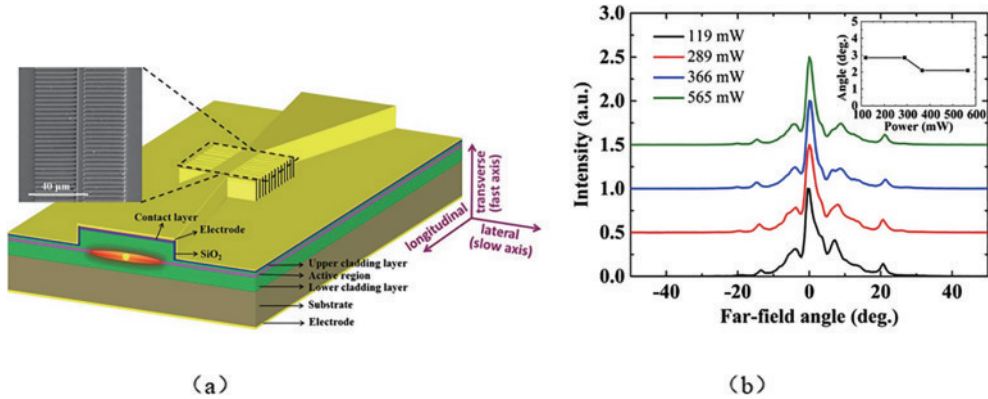


图 5 侧向光栅结构锥形激光器^[23]。(a) 器件结构图; (b) 不同输出功率下的侧向远场分布及发散角

Fig. 5 Tapered laser with high-order surface gratings (HOSGs)^[23]. (a) Structural diagram; (b) lateral far-field distribution and divergence angle under different output powers

3 微结构宽脊波导半导体激光器

大功率半导体激光器常采用宽脊波导结构, 该器件结构特征导致侧向光束质量通常较差。因此在设计这类器件时, 可以在其表面引入一些特殊的微结构来对电流注入特性及模式分布特性进行调控。这些调控方式主要包括微电极结构制备、和微刻蚀结构制备, 微电极结构即合理设计电极的分布位置和尺寸大小, 微刻蚀结构即对上波导进行一定深度的刻蚀。通过微结构可以改变器件内部的光场分布, 使得侧向光束质量得到改善, 实现大功率、高光束质量的激光输出。

早在 1988 年, 加州理工大学 Sheem 等^[24] 率先展开了电极方面的研究, 他们在激光器的上波导表面采用非均匀电注入形式, 形成类似于“领结”的电极结构, 器件结构如图 6 所示。通过对“领结”的尺寸进行不同的设计, 实现模式增益的调控。当注入电流增加时, 高阶侧模在这种结构下的增益要小于基侧模, 因此被抑制激励, 最终该器件获得了单瓣远场输出。

受此电极创新结构的启发, 2004 年国内薄报学等^[25] 制备了一种具有周期性电极结构的宽条形应变量子阱激光器, 如图 7 所示。该器件的电注入部分由一定数量的菱形微结构电极窗口等距离排布组成, 通过调控电流分布, 减弱了器件的自聚焦效应, 从而可以保持侧向小角度光束输出。经测试, 该器件最大输出功率为 5 W, 高于标准单条形电极器件; 在一定电流范围内, 随着注入电流的增大, 后者发散角偏大且为多侧模

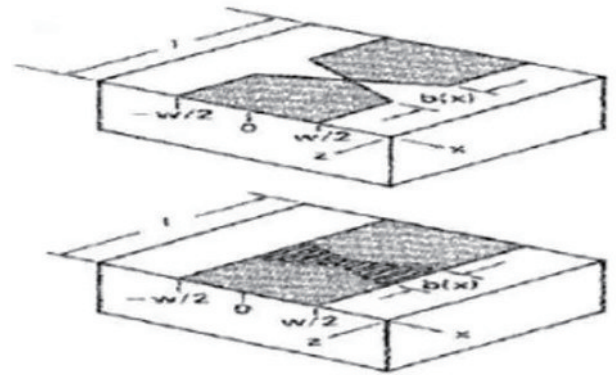


图 6 “领结”结构激光器示意图^[24]
Fig. 6 Structural diagram of “solid bow tie” laser^[24]

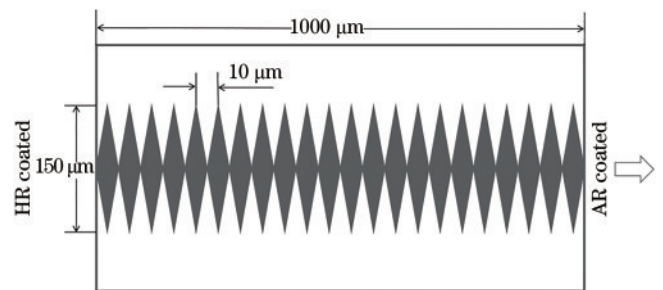


图 7 菱形微结构半导体激光器示意图
Fig. 7 Structural diagram of rhombus-like stripe laser

输出, 而该器件发散角基本保持不变, 均为单侧模输出。

除了对电极形式进行设计, 直接控制注入电流的

分布以外,对波导结构进行刻蚀,也是控制侧向光模式和光束质量的关键思路,根据其刻蚀位置及作用机理,有在波导表面刻蚀微结构和在波导侧向刻蚀微结构两种方式。

2008 年利诺伊大学 Crump 等^[26]和 Chen 等^[27]提出了一种表面周期性微阵列结构,通过聚焦离子束系统

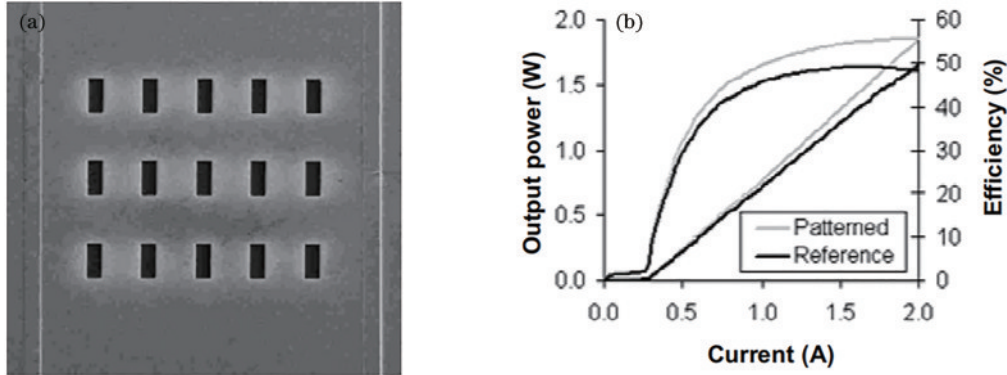


图 8 周期性小孔刻蚀形貌及效果^[27]。(a)扫描电镜图;(b)半导体激光器 P - I 特性曲线

Fig. 8 Morphology and efficiency of periodic small hole etching^[27]. (a) Scanning electron microscopy (SEM) photograph; (b) P - I characteristic curve of semiconductor laser

2016 年, Rong 等^[28]提出了一种鱼骨型微结构,如图 9 所示,宽脊波导边缘具有 7 对长度递增的沟槽,单个沟槽宽度为 $4\ \mu\text{m}$,间距为 $5\ \mu\text{m}$,沟槽长度最短为 $5\ \mu\text{m}$,并以 $5\ \mu\text{m}$ 为周期进行递增,工艺过程中沟槽深度接近波导层。将此结构应用于中红外 GaSb 基双应变量子阱

刻蚀三排直径为 $5\ \mu\text{m}$,深度为 $2\ \mu\text{m}$ 的小孔阵列,其形貌与刻蚀效果如图 8 所示。这种具有空间调制作用的微阵列结构加强了对高阶侧向模式的导引,改善了激光器侧向光束质量,同时,微结构的引入导致激光器中能量再分配,载流子与光强度分布实现了很好的重合,也提高了器件的内量子效率。

激光器中,最终制备的器件侧向远场发散角(95% 功率)降低了约 55%,且输出功率没有因刻蚀微结构而下降。此后, Rong 等^[29]进一步将这种结构应用到纵向光子晶体激光器上,器件的侧向半峰全宽优化超过 20%,侧向 M^2 降低 15.9%,输出功率也有一定程度的提高。

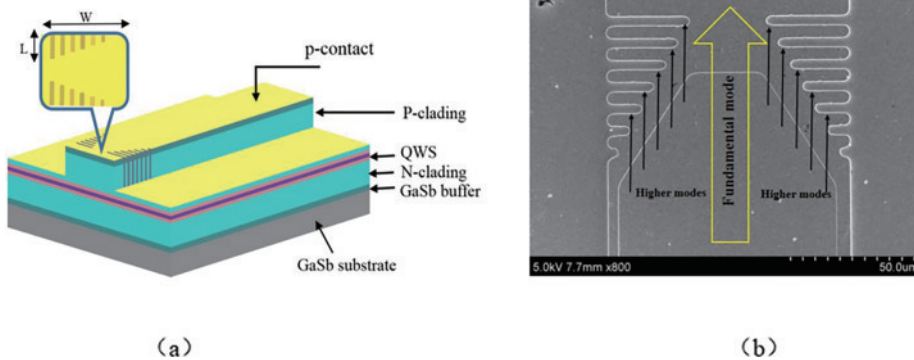


图 9 鱼骨型微结构 GaSb 基激光器^[28]。(a)器件结构图;(b)微结构的 SEM 图

Fig. 9 Structural diagrams of GaSb based laser with fishbone microstructure^[28]. (a) Structural diagram; (b) SEM photograph of microstructure

减少波导边缘载流子的积累对侧向光束质量控制也至关重要,2016—2017 年, Wang 等^[30-31]提出了两种基于载流子调控的器件,详细结构如图 10、图 11 所示。图 10 中的器件具有周期性二维电流调控结构(SCM),因此形成了周期性的增益-损耗调控机制,该器件台面边缘处载流子密度比标准器件小得多,侧向光束质量相较标准器件而言改善了 36.5%。图 11 中的器件具有侧向窄脊波导结构(LRW),窄脊共有 9 条,宽为 $8\ \mu\text{m}$,间距为 $15\ \mu\text{m}$,其长度(沿谐振腔方向)与谐振腔长比值设计为 20%。经测试,当注入电流为 4 A 时,

器件的输出功率为 4.8 W,侧向发散角随电流增加的速率仅为 $0.13\ (^{\circ})/\text{A}$,而无微结构的标准器件为 $1.27\ (^{\circ})/\text{A}$ 。这两种结构实现了增益分布和谐振强度调控,均有效减小侧向光场对电流的依赖性,减弱在大电流条件下侧向光束质量的恶化。

由此可见,对聚焦于宽脊波导表面的微刻蚀结构而言,合理设计微结构的排布方式、尺寸大小及刻蚀深度,对侧向光束质量具有显著的改善作用。在宽脊波导的两侧制备微结构,增强侧向高阶模式的损耗,也能很好地改善激光器侧向模式特性,同时,相比表面微结

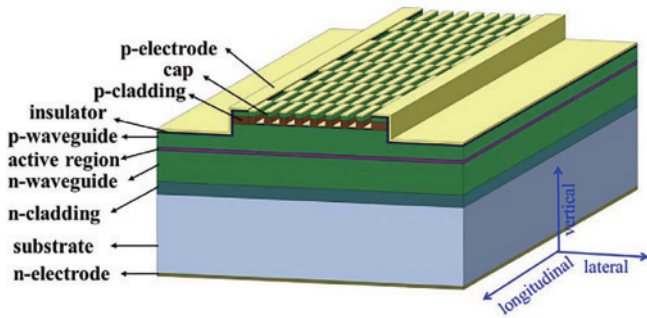


图 10 空间调制电流结构宽区半导体激光器结构图^[30]

Fig. 10 Structural diagram of broad area laser with SCM structure^[30]

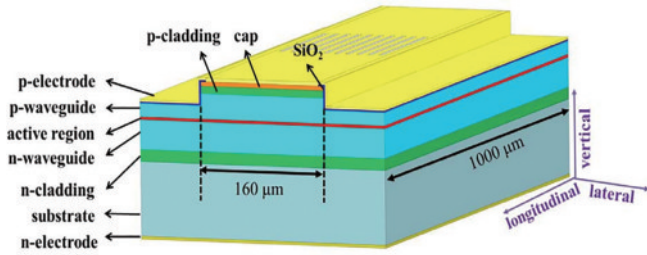


图 11 高功率侧向脊波导宽区半导体激光器结构图^[31]

Fig. 11 Structural diagram of broad area laser with LRW structure^[31]

构,侧向微结构基本可通过一次光刻及一次刻蚀实

现^[32],制备工艺相对简单。

2012年,Kalosha等^[33]建立了侧向非均匀波导模型,如图12所示。通过二维波导波动方程求解计算侧向模式的阈值,并对光模式进行分析。由于宽脊波导两侧微结构的不均匀性,激光器高阶侧模的散射损耗增大,侧向光束质量得以提升。2017年,Kaspi等^[34]在宽条量子级联半导体激光器(QCL)中引入分布式侧向损耗机制,沿器件侧壁直接生长金属,减弱了高阶侧模的竞争水平,从而提高侧向光束质量,其金属沉积步骤如图13所示。

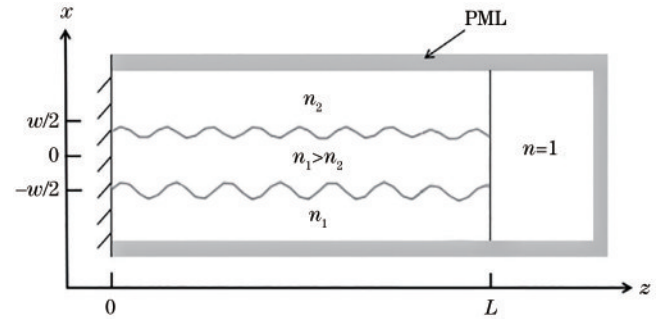


图 12 非均匀波导宽区激光器 2D 模型示意图

Fig. 12 2D structural diagram of broad area laser with inhomogeneous waveguide

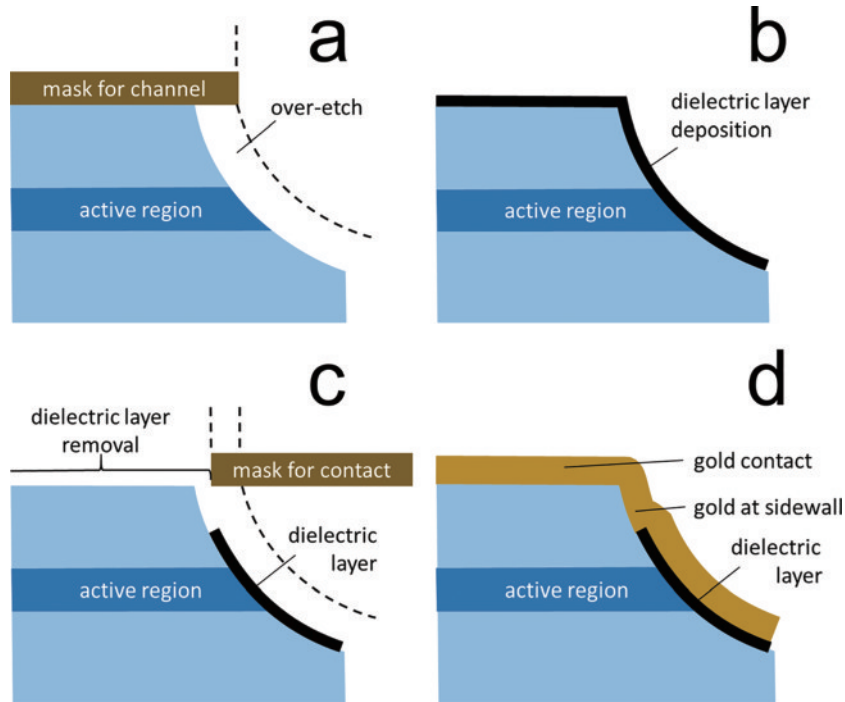


图 13 金属与 QCL 激光器侧壁接触的工艺步骤^[34]

Fig. 13 Sequence of steps leading to metal in contact with the sidewalls of the QCL device^[34]

上述研究^[33-34]实现了对侧向光束质量的优化,但由于高阶侧模损耗的影响,激光器的功率会下降。为了在单侧模的基础上进一步优化功率水平,2018年Miah等^[35]对外延结构进行改进,采用非对称波导结构并对掺杂水平进行调整,设计制备了一种侧向三角形

波导结构激光器,最终器件的基侧模输出功率可达到 800 mW。该器件与标准结构器件在不同驱动电流下的光束质量因子和亮度水平如图 14 所示。由图 14 可知,新结构器件的侧向 M^2 远低于标准器件,且激光亮度也明显高于标准器件。

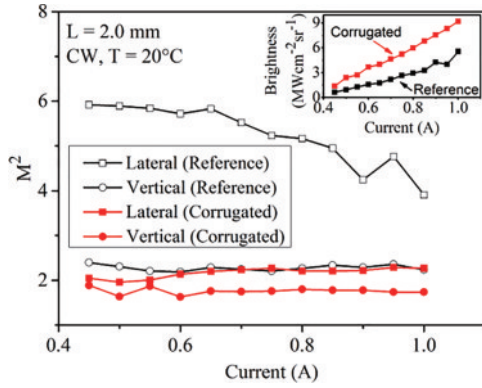


图 14 标准结构与新结构器件在 20 °C 室温、连续电流驱动条件下的侧向、垂直方向 M^2 [35]

Fig. 14 Lateral and vertical beam quality factors M^2 of the reference structure device and the new structure device at 20 °C room temperature, continuous current drive conditions [35]

4 散热封装结构

半导体激光器在工作时,有近一半的电机会换成热能,对大功率半导体激光器而言,侧向发光尺寸较宽,结平面上会呈现中心温度高,边缘温度低的不均匀分布状态,这会使得激光器产生热透镜效应,进而导致侧向光束质量恶化。

2006 年, Li 等 [36] 在脉宽为 0.1 ns 的脉冲电流条件下测试了 InGaAs 多量子阱激光器的输出特性,结果表明:热透镜效应导致的高阶侧模的激射阈值每 10 ns 降低约 5 mA,而基侧模激射阈值的变化量可忽略不计。2018 年, Rieprich 等 [37] 利用热成像相机测量了半导体激光器结平面的温度分布和光斑的光参数乘积 (BPP),定量计算了器件的热透镜效应对侧向光束发散角的影响,结果表明:超过 50% 的 BPP 是由热透镜效应引起的材料折射率变化而产生的。由此看来,为了提高半导体激光器的侧向光束质量,必须重视并改善废热带来的热透镜效应的影响,这不仅需要器件自身具备良好的性能,也对器件的散热封装结构提出了更高的要求。

2011 年,美国 nLight 公司研究人员 [38] 详细探究了芯片制备中的必备工艺——镀金——对芯片侧向散热效果的影响。结果表明,镀金足够厚(100 μm 左右)时,激光芯片侧向温度分布趋于一致,可减弱热透镜效应带来的影响,进而改善侧向发散角。但金作为一种贵金属,实际量产时需考虑成本问题,因此研究人员围绕新型散热方式展开了诸多研究。

2013 年, Piprek 等 [39] 在封装结构中引入空气隙,整体封装结构如图 15 所示。通过加入基座热沉的方式来引入空气隙,以此阻挡芯片边缘处的垂直热流,成功改变了芯片有源区的热分布,减小了芯片的热透镜效应,最终降低了光束侧向发散角。受此启发,2019 年,

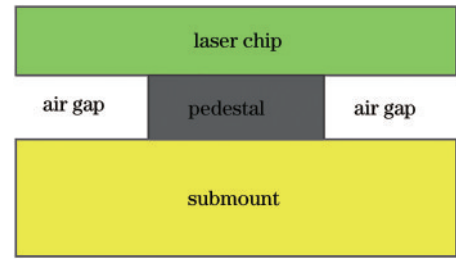


图 15 引入空气隙的激光器封装结构

Fig. 15 Structural diagram of laser package with air gap

Zhao 等 [40] 深入探究了不同空气隔离带宽度对激光器热特性的影响,对 808 nm 的 InGaAs/GaAs 宽条形激光器进行封装测试,对比分析发现,当过渡热沉宽度为 200 μm 时,光束侧向发散角降低了约 40%,相应 BPP 和 M^2 均降低 30% 左右。

2021 年,谢鹏飞等 [41] 对 AlN 陶瓷热沉进行直接加工,使用超快激光在热沉表面制备物理隔离槽,以此改变有源区的温度传导路径,进而削弱侧向温度梯度。对 915 nm 半导体激光芯片采用长为 4 mm、宽为 120 μm 的隔离槽封装后,在 15 A 工作电流条件下,侧向远场发散角和 BPP 均降低 14% 左右,此外,激光器侧向亮度提升了 1.2 倍。

考虑到热沉成本,2021 年蔡元红等 [42] 在优化散热通路的同时,也在电极上进行创新,制备了一种具有微热通道散热结构的电极,如图 16 所示。注入区电极采用高热导率材料,而两侧电极采用低热导率材料,这种方式能够在不受制于热沉结构的前提下改善激光器热透镜效应,注入电流为 2 A 时,侧向发散角降低了约 20%。

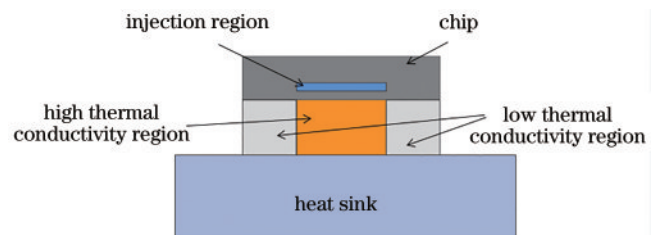


图 16 具有微热通道散热电极激光器的结构图

Fig. 16 Structural diagram of laser with microthermal channel cooling structure electrodes

以上提到的近几年热沉封装结构相关的研究进展均是对抑制热透镜效应、改善侧向光束质量方面的有效探索。此外,在热沉材料选择方面,也应注重材料的性能,近年来,国内外在新型热沉材料方面做了很多探索,如:金刚石 [43-45]、石墨烯 [46]、碳化硅 [47] 等,与常规的铜热沉、氮化铝陶瓷热沉相比,这些新型散热材料在散热性能与材料稳定性方面均具有更优异的表现,能够为优化散热路径、改善激光器侧向光束质量相关的研究提供思路。

5 三类光束质量控制方法的分析比较

近年来,国内外高光束质量半导体激光器的典型研究情况如表 1 所示。锥形激光器在一定功率范围内能保持较好光束水平,但在高电流、高功率条件下的应用明显受限,因此对其 MO 和 PA 部分分别进行电驱动^[14]、优化外延结构^[22]、与 DBR 光栅相结合^[22-23],这是

促进锥形激光器充分发挥优势的有效方法。由于宽区半导体激光器结构简单,实际应用最为广泛,国内外科研院所所在宽条微结构激光器的研究方面也获得了诸多成果,基侧模功率已接近瓦级^[34]。半导体激光器工作中必然会产生废热问题,需要靠良好的封装结构来改善^[39],改善器件热传导路径,抑制热透镜效应,对改善侧向光束质量十分关键。

表 1 近年国内外高光束质量半导体激光器研究情况

Table 1 Domestic and international research of high beam quality semiconductor lasers in recent years

Laser	Research institution	Main structure	P/W	Lateral beam quality
Laser in Ref. [22]	FBH, Germany	DBR tapered laser, super large optical cavity	8.1	$M^2=1.1$
Laser in Ref. [30]	University of Chinese Academy of Sciences, China	Broad area laser, SCM structure	4.8	Improve by 36.5%
Laser in Ref. [33]	Air Force Research Laboratory, America	Broad area QCL, distributed sidewall loss structure	6.0	—
Laser in Ref. [34]	Technische Universität Berlin, Germany	Single-transverse mode laser, triangular-shaped corrugation structure	0.8	$M^2 < 3$
Laser in Ref. [39]	University of Chinese Academy of Sciences, China	Package, air gap	1.3	Improve by 40%
Laser in Ref. [14]	University of Chinese Academy of Sciences, China	Tapered laser, separated contacts	6.4	$M^2=1.66$

6 总 结

现代各类激光器在要求高输出特性的同时,更好的光束质量已成为当前的研究热点之一,对大功率半导体激光器而言,侧向光束质量是制约其发展的主要因素。对此,国内外在器件结构和封装结构方面均做了许多探索,从 3 个思路介绍了当前研究中的对侧向光束质量的改进方法。

对兼具大功率和高光束质量的锥形半导体激光器而言,研究成果已层出不穷,未来要走向大规模量产,需要进一步优化器件结构,以及在保证精准的前提下进一步简化其制备工艺;对实现大功率目标最常用的宽脊波导半导体激光器而言,微结构的引入有效实现了对电流及光场的调控,保证了载流子的高效利用以及尽可能理想的侧模激励,随着激光器模式特性相关的理论研究和实验研究的不断深入,大功率宽脊波导半导体激光器的光束质量将会进一步优化发展,为大规模应用奠定坚实的基础;对器件的热沉封装结构而言,需要选择散热良好的热沉材料和封装形式,来改善器件的散热通路,进而削弱热透镜效应对侧向光束质量的影响,目前关于半导体激光器热沉封装方面的研究,国内仍处于发展阶段,未来仍需进一步探索高性能的热沉材料和高效率的封装结构。

参 考 文 献

[1] 王庆, 高春清. 人眼安全波段全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501004.

Wang Q, Gao C Q. Research progress on eye-safe all-solid-state single-frequency lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501004.

- [2] 刘泽金, 王红岩, 许晓军. 高能半导体泵浦气体激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401001.
Liu Z J, Wang H Y, Xu X J. High energy diode pumped gas laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401001.
- [3] 常奕栋, 王贞福, 张晓颖, 等. 808 nm 半导体激光芯片波导优化与效率特性分析[J]. 发光学报, 2021, 42(7): 1040-1048.
Chang Y D, Wang Z F, Zhang X Y, et al. Waveguide optimization and efficiency characteristic analysis of 808 nm laser diodes[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(7): 1040-1048.
- [4] Kaifuchi Y, Yoshida K, Yamagata Y, et al. Enhanced power conversion efficiency in 900-nm range single emitter broad stripe laser diodes maintaining high power operability[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10900: 109000F.
- [5] 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]. Journal of Semiconductors, 2020, 41(3): 032901.
- [6] 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.
- [7] Kintzer E S, Walpole J N, Chinn S R, et al. High-power, strained-layer amplifiers and lasers with tapered gain regions[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(6): 605-608.

- [8] Paschke K, Sumpf B, Dittmar F, et al. Nearly diffraction limited 980-nm tapered diode lasers with an output power of 7.7 W[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(5): 1223-1227.
- [9] Adamiec P, Sumpf B, Feise D, et al. Twin-contact 645-nm tapered laser with 500-mW output power[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(4): 236-238.
- [10] Michel N, Odriozola H, Kwok C, et al. High modulation efficiency and high power 1060 nm tapered lasers with separate contacts[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(2): 103-104.
- [11] Sujecki S, Borrueel L, Wykes J, et al. Nonlinear properties of tapered laser cavities[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(3): 823-834.
- [12] 李璟, 刘媛媛, 马骁宇. 电极分离的 980 nm 锥形激光器的研制[J]. *半导体学报*, 2007, 28(8): 1302-1306.
Li J, Liu Y Y, Ma X Y. High-brightness tapered diode lasers emitting at 980 nm with electrically separated ridge waveguide and tapered section[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(8): 1302-1306.
- [13] 曼玉选, 仲莉, 马骁宇, 等. 极低内部光学损耗 975 nm 半导体激光器[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1914001.
Man Y X, Zhong L, Ma X Y, et al. 975 nm semiconductor lasers with ultra-low internal optical loss [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1914001.
- [14] 曼玉选, 仲莉, 马骁宇, 等. 975 nm 分离电极锥形半导体激光器特性分析 [J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1701005.
Man Y X, Zhong L, Ma X Y, et al. Characteristic analysis of 975 nm tapered semiconductor lasers with separated contacts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1701005.
- [15] Mikulla M, Schmitt A, Chazan P, et al. Improved beam quality for high-power tapered laser diodes with LMG (low-modal-gain) epitaxial layer structures[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3284: 72-79.
- [16] Wang X Z, Erbert G, Wenzel H, et al. 17-W near-diffraction-limited 970-nm output from a tapered semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(2): 115-118.
- [17] 孙胜明, 范杰, 徐莉, 等. 976 nm 锥形半导体激光器结构设计及优化 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(12): 1205004.
Sun S M, Fan J, Xu L, et al. Design and optimization of 976 nm tapered semiconductor laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1205004.
- [18] Snjecki S, Wykes J, Sewell P, et al. Optical properties of tapered laser cavities[C]//*Proceedings of 2001 3rd International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE Cat. No. 01EX488)*, June 21, 2001, Cracow, Poland. New York: IEEE Press, 2001: 55-58.
- [19] Huang S S, Zhang Y, Liao Y P, et al. High-power single-spatial-mode GaSb tapered laser around 2.0 μm with very small lateral beam divergence[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 24(8): 66-69.
- [20] 王芝浩, 王警辉, 刘帅男, 等. 数值模拟 980 nm 锥形半导体激光器输出特性[J]. *发光学报*, 2022, 43(2): 275-284.
Wang Z H, Wang J H, Liu S N, et al. Numerical simulation on output characteristics of 980 nm tapered semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(2): 275-284.
- [21] Kaunga-Nyirenda S, Bull S, Lim J, et al. Factors influencing brightness and beam quality of conventional and distributed Bragg reflector tapered laser diodes in absence of self-heating[J]. *IET Optoelectronics*, 2014, 8(2): 99-107.
- [22] Müller A, Fricke J, Bugge F, et al. DBR tapered diode laser at 1030 nm with nearly diffraction-limited narrowband emission and 12.7 W of optical output power[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9767: 97671I.
- [23] Liu L, Qu H W, Wang Y F, et al. High-brightness single-mode double-tapered laser diodes with laterally coupled high-order surface grating[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3231-3234.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Crump P, Leisher P, Matson T, et al. Control of optical mode distribution through etched microstructures for improved broad area laser performance[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(13): 131113.
- [27] Chen C, Leisher P, Patterson S, et al. Stabilization of lateral mode transients in high-power broad area semiconductor lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(1): 011107.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(11): 112102.
- [31] 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]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(7): 071404.
- [32] 齐军, 邹永刚, 范杰, 等. 1064 nm 侧向微结构宽脊波导半导体激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1301003.
Qi J, Zou Y G, Fan J, et al. 1064 nm wide-ridge waveguide semiconductor laser with lateral microstructure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1301003.
- [33] Kalosha V P, Posilovic K, Bimberg D. Lateral-longitudinal modes of high-power inhomogeneous waveguide lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(2): 123-128.

- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Li D Y, Huang Y Z, Zhu J J, et al. Thermal lensing effect in ridge structure InGaN multiple quantum well laser diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(4): 046101.
- [37] 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.
- [38] Bai J G, Leisher P, Zhang S 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.
- [39] Piprek J. Inverse thermal lens effects on the far-field blooming of broad area laser diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 958-960.
- [40] 赵碧瑶, 井红旗, 仲莉, 等. 808 nm 宽条型激光器绝热封装改善慢轴光束质量(英文)[J]. 发光学报, 2019, 40(11): 1417-1427.
Zhao B Y, Jing H Q, Zhong L, et al. Improving slow axis beam quality of 808 nm broad-area laser diodes with adiabatic package[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(11): 1417-1427.
- [41] 谢鹏飞, 雷军, 吕文强, 等. 基于横向热流抑制的半导体激光芯片封装实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(2): 021003.
Xie P F, Lei J, Lü W Q, et al. Experimental investigation of the package of diode laser chip based on lateral heat flow suppression[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(2): 021003.
- [42] 蔡元红, 高欣, 王警辉, 等. 微热通道电极结构宽条形半导体激光器输出特性[J]. 发光学报, 2021, 42(4): 518-525.
Cai Y H, Gao X, Wang J H, et al. Output characteristics of broad-area stripe semiconductor lasers with microthermal channel anode structure[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(4): 518-525.
- [43] Kuc M, Wasiak M, Sarzała R P. Impact of heat spreaders on thermal performance of III-N-based laser diode[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(4): 474-482.
- [44] 戴玮, 李嘉强, 曹剑, 等. CVD 金刚石热沉封装高功率半导体激光器的热特性[J]. 光电子·激光, 2019, 30(3): 227-233.
Dai W, Li J Q, Cao J, et al. Thermal performance of high power semiconductor lasers packaged on CVD diamond heatsink[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(3): 227-233.
- [45] 孙芮, 房玉锁, 彭海涛, 等. 金刚石封装半导体激光器特性研究[J]. 电子制作, 2020(23): 88-90.
Sun R, Fang Y S, Peng H T, et al. Study on characteristics of diamond packaged semiconductor laser [J]. Practical Electronics, 2020(23): 88-90.
- [46] Zhang Y, Han H X, Wang N, et al. Improved heat spreading performance of functionalized graphene in microelectronic device application[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(28): 4430-4435.
- [47] 倪羽茜, 井红旗, 孔金霞, 等. 碳化硅封装高功率半导体激光器散热性能研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101002.
Ni Y X, Jing H Q, Kong J X, et al. Thermal performance of high-power laser diodes packaged by SiC ceramic submount[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101002.