



10 W 级主控振荡放大半导体激光芯片封装实验研究

谢鹏飞^{1,2}, 雷 军^{1,2}, 张永刚^{1,2}, 王丞乾^{1,2}, 吕文强^{1,2}, 王 昭^{1,2}, 杜维川^{1,2}, 高松信^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 结温升高是影响主控振荡放大(MOPA)半导体激光芯片输出功率的重要因素,为解决 MOPA 芯片的多电极封装和高效散热问题,提出了一种正装和热扩散辅助次热沉相结合的封装结构。建立了该封装结构的 3D 热模型,对比研究了倒装封装结构、正装无辅助次热沉结构与正装有辅助次热沉结构对 MOPA 半导体激光器结温的影响。计算结果表明,采用正装有辅助次热沉结构与倒装封装结构散热性能接近,且显著优于正装无辅助次热沉结构,结温降低幅度最高可达 40%。另外,采用正装有辅助次热沉封装结构的 MOPA 半导体激光芯片在连续工作条件下输出功率为 10.5 W,谱宽可实现半高全宽小于 0.1 nm,中心波长随电流的变化约 14 pm/A,实现了 10 W 级 MOPA 芯片的封装,验证了该封装结构的有效性。

关键词: 锥形半导体激光器;热设计;封装结构;热沉

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220235

Study of packaging in master oscillator power amplifier diode laser chip

Xie Pengfei^{1,2}, Lei Jun^{1,2}, Zhang Yonggang^{1,2}, Wang Chengqian^{1,2}, Lü Wenqiang^{1,2},

Wang Zhao^{1,2}, Du Weichuan^{1,2}, Gao Songxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The increase in junction temperature is an important factor affecting the output power of master oscillator power amplifier (MOPA) diode laser chip. To achieve the packaging and efficient heat dissipation of the multi-electrode MOPA semiconductor laser chip, a packaging structure that combining P-side up with heat spreader was proposed. An analytical three-dimensional thermal model was employed to study the influence on junction temperature between the P-side down, P-side up without heat spreader and P-side up with heat spreader. According to the three-dimensional thermal model, the conduction-cooled capability between P-side up with heat spreader and P-side down is uniform in this paper. Moreover, the packaging can lead to a maximal 40% decrease on junction temperature. By the way, the P-side up with heat spreader structure was used in MOPA diode laser chip in experiment then 10.5 W output power and the spectrum width (FWHM) <0.1 nm of the MOPA chip were obtained in CW mode.

Key words: master oscillator power amplifier diode laser, thermal design, package structure, heat sink

半导体激光器具有体积小、效率高、寿命长、发射波长范围广等特点,被广泛应用在医疗、工业加工、通讯和军事等领域。主控振荡放大半导体激光器(MOPA)是由脊型波导区(MO)和锥形放大区(PA)组成,其中 MO 产生单模种子激光,PA 对单模种子光源进行功率放大,从而实现高的输出功率,且不影响光束质量^[1-3]。传统的半导体激光器由于受条宽和腔面失效(COMD)的限制,其光束质量较差,亮度只能到几十 MW/(cm²·sr)。然而,由于锥形半导体激光器脊形波导区的选模作用,且锥形放大区放大的激光是基横模的,因此在锥形区腔面输出的激光则是近衍射极限的,亮度可达几百 MW/(cm²·sr)^[4-6]。据文献报道,德国 FBH 研究所采用非对称-超大光学腔的 MOPA 芯片,在波长 979 nm 上输出功率 9.5 W,光束质量平方因子 $M^2(1/e^2) < 1.1$,亮度达 1000 MW/(cm²·sr)^[7-8]。通常,锥形半导体激光芯片在结构上由 2 种及以上的功能区组成,且不同功能区为分离式电注入,从而实现半导体激光芯的高功率和近衍射极限输出。然而实际在对 MOPA 芯片进行封装时,考虑到分离式电注入、PA 区热流密度高和封装应力等因素,若沿用传统条形半导体激光芯片的倒装(P-side down)封装结构,虽然可实现 PA 区的良好散热,但存

* 收稿日期:2022-07-27; 修订日期:2023-02-22
联系方式:谢鹏飞, xiepgf@126.com。

在 MOPA 不同功能区无法分离式电注入和封装应力大的问题。除此之外,当前国内外对锥形半导体激光芯片的封装结构设计报道较少,因此研究多电极的锥形半导体激光芯片封装技术具有现实意义^[9]。本文提出了一种正装(P-side up)和热扩散辅助次热沉相结合的封装结构,该封装结构既可满足分离式电注入的要求,也可实现 PA 区散热,同时该结构的封装应力远小于倒装封装结构。根据热模型计算结果,采用正装有辅助次热沉结构与倒装封装结构散热性能接近,且显著优于正装无辅助次热沉结构,结温降低幅度最大可达 40%。基于热分析开展了验证实验,结果表明,采用正装有辅助次热沉封装结构的多电极锥形半导体激光芯片在连续工作条件下输出功率为 10.5 W,谱宽可实现半高全宽小于 0.1 nm,中心波长随电流的变化约 14 pm/A,验证了该封装结构的有效性。

1 封装结构热设计

传统半导体激光器在工作时,PN 结中注入的能量一部分会转化成热量,从而导致有源区温度升高。有源区内热功率密度常用表达式为^[10]

$$Q_{\text{active}} = V_j/d_a \{ j_{\text{th}}(1 - \eta_{\text{sp}}f) + (j_b - j_{\text{th}}) * [1 - \eta_{\text{ex}} - (1 - \eta_i)\eta_{\text{sp}}f] \} \quad (1)$$

式中: d_a 为有源区的厚度; V_j 为结电压; j_b 为注入电流密度; j_{th} 为阈值电流密度; η_{sp} 为自发辐射量子效率; η_i 为内量子效率; η_{ex} 为微分量子效率; f 为逃逸系数。

常见的 MOPA 芯片如图 1 所示。通过对半导体激光芯片进行封装和散热,从而将有源区产生的热量进行有效传导,从而降低了半导体激光芯片的结温。热阻 R_{th} 是衡量半导体激光芯片散热性能的重要参数,其表达式为^[11]

$$R_{\text{th}} = (T_j - T_0)/P_{\text{tem}} \quad (2)$$

式中: T_j 为有源区温度; T_0 为热沉温度; P_{tem} 为热功率。在热功率确定时,不同封装结构和封装材料对结温的影响不同。采用有限元数值分析方法对 MOPA 芯片的不同封装结构进行模拟和对比^[12-14], MOPA 芯片封装结构示意图如图 2 所示,表 1 为计算使用的各种材料物理参数^[15]。

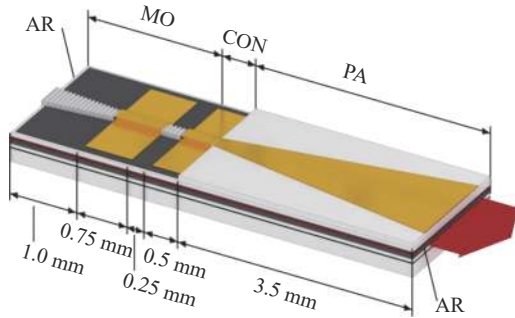


Fig. 1 Schematic of the MOPA diode laser^[8]

图 1 MOPA 芯片示意图^[8]

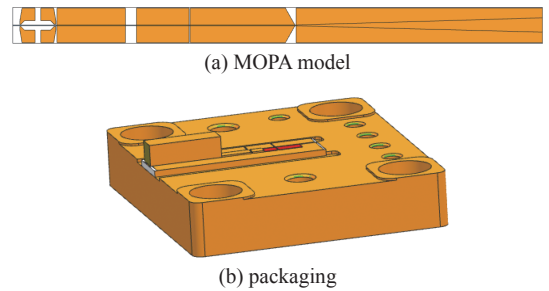


Fig. 2 Model of MOPA diode laser chip and packaging of the chip

图 2 MOPA 芯片结构示意图及封装示意图

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

material	thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	coefficient of thermal expansion/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	thickness/μm	width/mm
GaAs	55	6.4	120	1.0
AlN	230	4.5	500	4.5
W ₉₀ Cu ₁₀	180	4.5	1000~3000	2.0~4.5

1.1 不同封装结构热分析

MOPA 芯片由多个功能区组成,每个功能区产热不同,其中 PA 区为 MOPA 芯片的主要产热区。因此,本文主要对 MOPA 芯片的 PA 区进行稳态热分析,同时忽略 MOPA 芯片的空气对流传热和热辐射。设定 PA 区热功率为 15 W,环境温度 20 °C,对流换热系数(HTC)为 20~200 kW·m⁻²·K⁻¹,分别对 P-side up, P-down 和正装辅助热扩散次热沉结构进行热分析,不同封装结构的温度分布及结温(T_j)与对流换热系数关系如图 3 所示。图 3 为 MOPA 芯片 P 面朝上, N 面在有热沉下的结温随对流换热系数关系曲线,考虑到 GaAs 材料和热沉材料的热膨胀匹配,选用 AlN 为热沉材料。从图 3 可以看出,对于该封装结构,结温随对流换热系数增加而逐渐降低,但该结构在 HTC 达到 200 kW·m⁻²·K⁻¹ 时结温大于 70 °C,无法满足实际使用。

基于图 3 的热分析模拟结果,本文提出正装热扩散辅助次热沉的封装结构, MOPA 芯片 P 面朝上, 并在该面封装次热沉, 即通过 MOPA 芯片 N 面热沉传热又通过次热沉的高热导率来匀化芯片结温, 从而实现有效降低结温的目的。采用有限元数值分析方法对该封装结构进行模拟计算, 其中, 辅助次热沉厚度为 1 mm, 考虑到热沉与 GaAs 材料的热膨胀系数匹配, 辅助次热沉材料选用 WCu。并将该封装结构下的结温与倒装结构结温进行对比, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 正装热扩散辅助次热沉结构的结温变化与倒装结构结温变化趋势一致, 而对于正装热扩散辅助次热沉封装结构而言, 当对流换热系数大于 $55 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 时, MOPA 芯片结温小于 $57 \text{ }^\circ\text{C}$, 即可满足使用要求。由于倒装结构的热阻相对小, 在高对流换热下, 倒装封装结构的结温降低速率更快, 但是两种封装结构下的 MOPA 芯片整体结温相差不大, 在本研究的边界条件下两种封装结构散热性能接近。

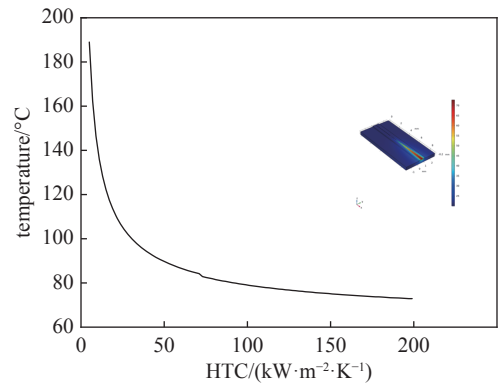


Fig. 3 Curve of T_j in P-side up and N side with heat sink
图 3 正装结构下的结温变化曲线

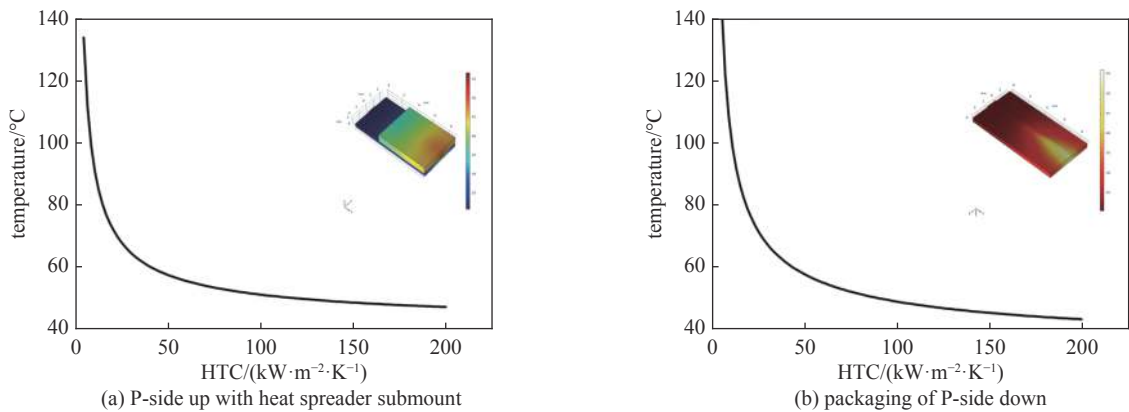


Fig. 4 Curve of T_j between P-down and P-side up with heat spreader submount
图 4 正装热扩散辅助次热沉与倒装结构对比

对比正装无热扩散辅助次热沉和正装热扩散辅助次热沉两种结构的结温随对流换热系数变化的曲线, 如图 5 所示。从图中可以看出, 正装热扩散辅助次热沉结构可有效降低 MOPA 芯片结温, 达到了实际使用要求, 且在对流换热系数大于 $200 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 时, 降低幅度达 40%。文献 [16] 曾报道过基于正装热扩散辅助次热沉结构所封装的芯片性能。

1.2 次热沉结构设计

基于以上热分析结果, 选用正装热扩散辅助次热沉结构作为 MOPA 芯片的封装结构, 其中次热沉在该封装结构中起到在 PA 区均匀电注入和对有源区结温的传导和匀化作用。基于此, 对次热沉进行厚度 (thickness) 和宽度 (width) 方向的结构设计, 其中材料为 WCu, MOPA 芯片有源区结温随次热沉尺寸变化关系如图 6 所示。从图 6 可以看出, 在 HTC 一定的条件下, 有源区结温会随着次热沉尺寸增大而降低, 但随着尺寸不断增大, 结温降低趋势变慢。

2 封装实验与结果

2.1 封装实验

基于正装热扩散辅助次热沉的封装结构和相应的热分析模拟计算结果, 采用 WCu 次热沉对 MOPA 芯片开展封装实验。首先将 MOPA 芯片的 N 面焊接在 AlN 热沉上, 焊料为 AuSn, 然后再将次热沉焊接在 MOPA 芯片对应 PA 区, 焊料为 In, 最后对该封装单元的不同区域进行引线键合以实现 MOPA 芯片不同功能区的加电测试, 所形成的

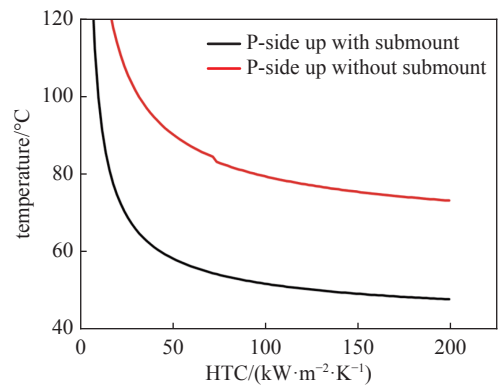


Fig. 5 Curve of T_j in two different structures with P-side up
图 5 两种不同正装结构下的结温对比

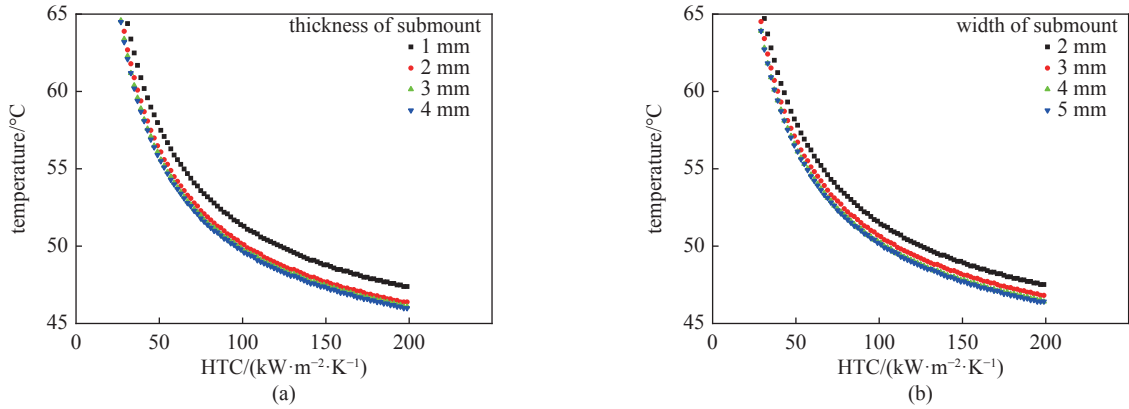


Fig. 6 Curve of T_j as submount dimension changes

图 6 有源区结温随次热沉尺寸变化关系

实物如图 7 所示。

2.2 测试结果

在连续条件下对封装后的 MOPA 芯片进行 $P-I$ 曲线和光谱特性测试, 其中 MOPA 芯片测试装置如图 8(a) 所示, $P-I$ 曲线如图 8(b) 所示, 光谱特性如图 9(a) 所示, 不同电流下的束腰如图 9(b) 所示。根据 $P-I$ 曲线, 采用正装热扩散辅助次热沉结构封装后的 MOPA 芯片连续输出功率可达 10.5 W@13 A。对输出光谱(图 9(a))的测试结果进行高斯拟合, 根据拟合结果, 该 MOPA 芯片的谱宽可实现小于 0.1 nm。根据不同电流下的输出光谱测试(图 9(b)), 封装后的 MOPA 芯片中心波长随电流的变化约 14 pm/A。

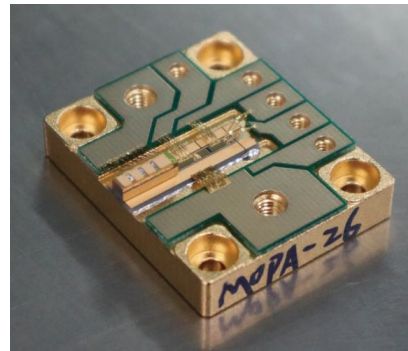
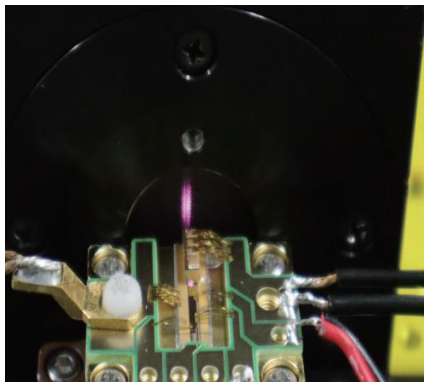
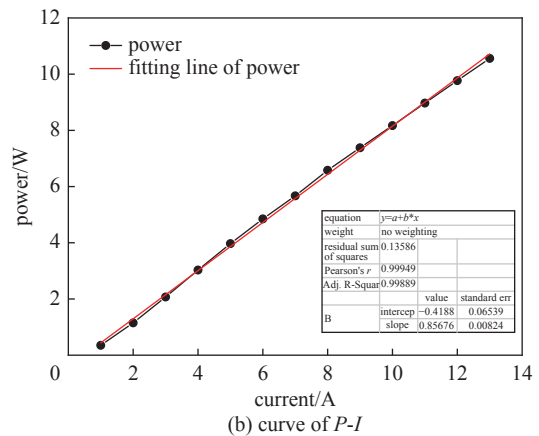


Fig. 7 Picture of real product

图 7 MOPA 芯片封装实物



(a) test picture of MOPA diode laser



(b) curve of $P-I$

Fig. 8 Test picture of MOPA diode laser and curve of $P-I$

图 8 MOPA 芯片测试装置及 $P-I$ 输出曲线

3 结 论

为了解决 MOPA 芯片在封装过程中的分离式电注入、高热流密度和热应力间的耦合问题, 本文提出了一种正装和热扩散辅助次热沉相结合的封装结构。与传统封装结构相比, 该封装结构以正装结构为基础, 然后在芯片 N 面进行热沉焊接以高效传导有源区结温。特别地, 为了保证 MOPA 芯片 PA 区散热, 在 PA 区设计了热扩散辅助次热沉, 更进一步地降低了结温, 既实现了散热又实现了分离式电注入, 同时正装封装结构还降低了封装应力。通过有限元数值分析, 分别对比了倒装、正装无辅助次热沉结构与正装有辅助次热沉结构对有源区结温的影响关系, 热分析结果表明, 在本研究的边界条件下采用正装有辅助次热沉结构与倒装封装结构散热性能接近, 且显著优于正装无辅助次热沉结构, 结温降低幅度最大可达 40%。同时对次热沉的结构进行了设计, 结果表明在对流换热

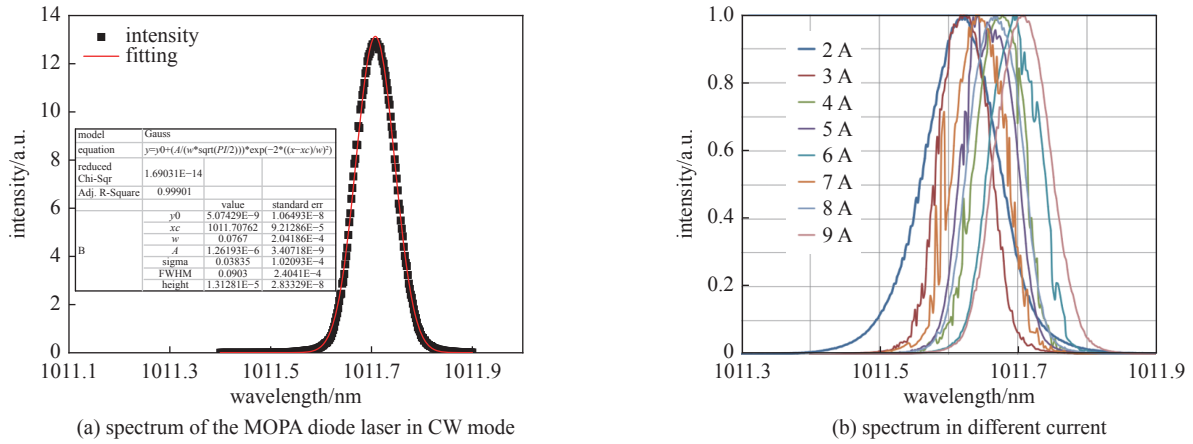


Fig. 9 Spectrum of the MOPA diode laser in CW mode and the spectrum in different current

图9 MOPA 芯片连续状态下的输出光谱和不同电流下的光谱变化

系数一定的条件下有源区结温会随着次热沉尺寸增大而降低,但随着尺寸不断增大,结温降低趋势变慢。最后基于热分析开展了验证实验,结果表明,采用正装有辅助次热沉封装结构的锥形半导体激光芯片在连续工作条件下输出功率为 10.5 W,谱宽可实现小于 0.1 nm,中心波长随电流的变化约 14 pm/A,完成了 MOPA 芯片的散热和不同功能区的电注入,实现了 10 W 级 MOPA 芯片的封装,验证了该封装结构的有效性。

参考文献:

- [1] 孙胜明, 范杰, 徐莉, 等. 锥形半导体激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 48-58. (Sun Shengming, Fan Jie, Xu Li, et al. Progress of tapered semiconductor diode lasers[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 48-58)
- [2] 吴涛, 郭栓银. 980 nm 高功率锥形激光器巴条的制备及光电特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53: 041401. (Wu Tao, Guo Shuanyin. Fabrication and electro-optic properties of 980 nm high-power tapered laser bar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 041401)
- [3] Albrodt P, Jamal M T, Hansen A K, et al. Recent progress in brightness scaling by coherent beam combining of tapered amplifiers for efficient high power frequency doubling[C]//Proceedings of SPIE 10900, High-Power Diode Laser Technology XVII. 2019: 109000O.
- [4] 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[C]//Proceedings of SPIE 9767, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XV. 2016: 976711.
- [5] 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: 1501107.
- [6] Müller A, Fricke J, Bugge F, et al. DBR tapered diode laser with 12.7 W output power and nearly diffraction-limited, narrowband emission at 1030 nm[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122: 87.
- [7] Fiebig C, Blume G, Kaspari C. 12W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(21): 1253-1255.
- [8] Zink C, Maaßdorf A, Fricke J, et al. Diffraction limited 1064nm monolithic DBR-master oscillator power amplifier with more than 7W output power[C]//Proceedings of SPIE 10553, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XVII. 2018: 105531C.
- [9] Tawfiq M, Wenzel H, Della Casa P, et al. High-power sampled-grating-based master oscillator power amplifier system with 23.5 nm wavelength tuning around 970 nm[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(29): 8680-8685.
- [10] 张建伟, 宁永强, 张星, 等. 基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析[J]. *中国激光*, 2012, 39: 1002003. (Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, et al. Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39: 1002003)
- [11] Wu Yulong, Dong Zhiyong, Chen Yongqi, et al. Beam shaping for kilowatt fiber-coupled diode lasers by using one-step beam cutting-rotating of prisms[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(34): 9769-9773.
- [12] Wu Dihai, Zah C E, Liu Xingsheng. Thermal design for the package of high-power single-emitter laser diodes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106266.
- [13] Mostallino R, Garcia M, Deshayes Y, et al. Thermal investigation on high power dfb broad area lasers at 975nm, with 60% efficiency[C]//Proceedings of SPIE 9733, High-Power Diode Laser Technology and Applications XIV. 2016: 97330S.
- [14] Fang Junyu, Zhang He, Zou Yonggang, et al. Thermal management of a semiconductor laser array based on a graphite heat sink[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7708-7715.
- [15] 王娇娇, 石琳琳, 马晓辉, 等. 多单管堆叠半导体激光器热分析及光纤耦合模拟仿真设计[J]. *发光学报*, 2021, 42(1): 104-110. (Wang Jiaojiao, Shi Linlin, Ma Xiaohui, et al. Thermal analysis and fiber coupling simulation design of multi-single emitters stacked semiconductor laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(1): 104-110)
- [16] Missaggia L J, Huang R K, Chann B, et al. High-power slab-coupled optical waveguide laser array packaging for beam combining[C]//Proceedings of SPIE 6478, Photonics Packaging, Integration, and Interconnects VII. 2007: 647806.