

高效率大功率 976 nm 半导体激光芯片设计与制备

付鹏¹, 张艳春², 赵涛^{1*}, 赵勇明², 唐松², 李颖², 韩沈丹¹¹广东先导院科技有限公司, 广东 广州 510535;²度亘核芯光电技术(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215124

摘要 976 nm 高效率大功率半导体激光芯片是光纤激光器的核心部件, 具有极为重要的产业价值。报道了课题组在高效率大功率半导体激光芯片的设计、制作与测试方面的研究成果。为了最大限度地提高器件的功率转换效率, 同时满足苛刻的寿命要求, 在设计上采用双非对称大光腔波导结构, 同时对量子阱结构、波导结构、掺杂以及器件结构进行了优化; 在外延生长方面, 系统地优化了生长工艺参数, 确保了外延材料具有极高的内量子效率及低内损耗。大量测试表明: 所制作的器件(腔长为 5 mm、发光条宽为 200 μm 的芯片)在室温、连续波(CW)测试条件下, 阈值电流约为 1 A, 斜率效率为 1.14 W/A; 当电流为 9 A 时, 最高功率转换效率高达 72.4%; 当电流为 30 A 时, 输出功率达到 29.4 W, 功率转换效率为 61.3%; 对应于 95% 光场能量的水平远场发散角低至 8.7°。上述参数性能已经达到了国际同类产品的先进水平。

关键词 激光器; 半导体激光芯片; 高功率转换效率; 高功率; 低水平远场发散角; 976 nm

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230896

1 引言

掺镱光纤激光器(YDFL)已经大规模地被应用于工业先进制造等领域^[1-2]。刘潘^[3]指出, 2018—2022 年中国光纤激光器市场规模从 77.4 亿元增长到 122.6 亿元, 年复合增长率达到 9.6%。展望未来, 随着需求迎来修复叠加新赛道、新产品逐步开拓, 2023 年国内光纤激光器市场需求恢复正增长, 达到 135.5 亿元, 同比增长超过 10%。从中国光纤激光器国产化渗透率来看, 大功率国产化渗透率增长显著, 在 2022 年末我国光纤激光器大功率国产化渗透率达到 74%。

伴随着市场规模的快速扩张, 光纤激光器的功率也在呈指数提升。2004 年英国南安普敦大学最早报道了 1.36 kW 连续波光纤激光器^[4]。随后光纤激光器的功率持续提升, 目前商用单模光纤激光器的输出功率已达 20 kW, 多模光纤激光器的输出功率达到 100 kW^[5]。掺 Yb³⁺ 石英光纤的吸收谱所对应的光谱范围为 880~1030 nm。在此范围内, 存在着两个显著的吸收峰, 即 915 nm 和 976 nm。与 915 nm 吸收峰相比, 976 nm 处的吸收截面大约是 915 nm 处吸收截面的 3 倍以上。高的吸收截面不仅意味着可以减小所需要的有源光纤长度, 从而节约成本, 而且可以削弱有源光纤的非线性效应, 有利于进一步提高光纤激光器的输出功率。此外, Yb³⁺ 掺杂的有源光纤的发射谱峰在

1040 nm 左右, 所以采用 976 nm 作为其泵浦源就意味着可以实现更高的光光转换效率。过去十余年, 高效率 976 nm 半导体激光器的输出功率一直在持续提升, 性能提升主要依赖于更高效的外延结构设计以及发光条宽的增加。日本 Hamamatsu Photonics 公司的 Morita 等^[6]在 2013 年报道了高功率转换效率(PCE)的 976 nm 宽条(96 μm)激光器, 器件在 20 °C 测试环境下的最高功率转换效率为 68% (对应的输出功率为 6.3 W), 当输出功率为 15.0 W 时, 效率降低到 61%。德国 FBI 研究所的 Crump 等^[7]在 2009 年报道了 96 μm 条宽的激光器在 20 W 输出功率下的寿命测试超过 4000 h。2015 年, 美国 nLight 公司也报道了 5 mm 腔长、150 μm 条宽的 980 nm 单管器件, 在 25 °C 连续波(CW)条件下, 最高转换效率为 65%, 18 W 输出时的功率转换效率达到 55%^[8]。2017 年, 日本的 Fujikura 公司报道了 4 mm 腔长、220 μm 条宽的 915 nm 单管激光器, 最高功率转换效率达到 68%, 输出功率为 27 W 时的功率转换效率大于 60%^[9]。2018 年, 深圳瑞波公司的胡海等^[10]报道了输出功率近 20 W、功率转换效率超过 60% 的 976 nm 宽条激光器。2019 年, 日本 Kaifuchi 等^[11]报道了 4 mm 腔长、180 μm 条宽的 975 nm 单管器件, 实现的最高功率转换效率为 72.5%, 输出功率为 20 W 时的功率转换效率达到 66.7%。2021 年, 度亘核芯光电技术(苏州)有限公司

收稿日期: 2023-08-11; 修回日期: 2023-09-17; 录用日期: 2023-09-26; 网络首发日期: 2023-10-24

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B090922005)

通信作者: *zthyc@163.com

的 Liu 等^[12]报道了 220 μm 条宽的 976 nm 半导体激光器, 实现了 34.5 W 的最高输出功率。2022 年, 度亘核芯光电技术(苏州)有限公司进一步报道了 5.0 mm 腔长、230 μm 条宽的 915 nm 单管器件, 最高功率转换效率达到 72.6%, 输出功率为 30 W 时的功率转换效率高达 67.3%^[13]。除了输出功率与效率之外, 器件的可靠性同样十分重要, 也是芯片设计时需要重点考虑的内容。半导体激光器的可靠性与多种因素有关, 包括结温、电流密度以及光功率密度等, 其中高光功率密度引起的腔面失效仍是影响器件可靠性的最常见的因素。陈芬等^[14]报道了改善激光器光束质量的几种方式。为了改善激光器稳定工作的可靠性, 人们采用若干方法, 如低功率密度设计^[15-16]、腔面热隔离技术^[17]、非吸收腔面技术等^[18]。针对高功率、高功率转换效率以及高可靠性的目标, 本文采用了双非对称大光腔结构、低功率密度设计理念, 并系统地优化了各项结构参量, 包括波导结构、掺杂分布、器件腔长、腔面反射率等以提高器件效率。本文总结了我们在过去三年来在高效率、高功率 976 nm 激光器的设计与制作方面所取得的进展。实验测试表明, 新器件的功率转换效率最高达 72.4%, 输出功率为 29.4 W 时仍保持有 61.3% 的功率转换效率。

2 外延结构设计

半导体激光器外延结构设计包括量子阱的选取、波导设计以及掺杂优化等方面。对于基于光纤激光器泵浦源的 976 nm 高功率半导体激光芯片而言, 波长须与 Yb^{3+} 掺杂有源光纤的吸收峰精准匹配, 所以在设计激光器量子阱时, 需要考虑芯片封装、热管理、环境温度以及工作电流等参数对实际激光波长的影响。在此基础上, 综合考虑确定量子阱在室温下的光致发光(PL)波长, 选取合适的量子阱材料, 优化组分以及厚度, 保证器件的性能和可靠性。对于 976 nm 高功率半导体激光芯片, 最常用的量子阱材料是 In_xGaAs , 其中 In 组分含量需要根据所采用的量子阱厚度作必要的调整, 比如当量子阱厚度为 8 nm 时, In 组分摩尔分数(x)大约为 0.153, 当量子阱厚度减小到 6 nm 时, In 组分摩尔分数则变为 0.175。值得说明的是, 在上述变化范围内, 不同量子阱材料对激光器的性能并无明显影响。除量子阱材料之外, 势垒材料 Al_xGaAs 中 Al 的含量对器件的性能有重要影响, Al 的含量需要足够高, 以确保器件在高温运行时具有足够高的内量子效率。根据上述原则, 我们采用了 8 nm 厚的 $\text{In}_{0.153}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.17}\text{GaAs}$ 量子阱结构。

在量子阱材料类型确定后, 需要根据功率大小、芯片腔面工艺水平等进行外延结构设计, 寻求合适的功率密度以及合适的光场分布设计。对于高功率半导体激光器, 限制其功率指标的因素主要有: 在高电

流注入下结温升高会引起功率下降, 以及高光功率密度会造成腔面光学灾变损伤。基于上述因素, 在外延结构设计中, 通常采用大光场分布、低功率密度的设计理念。基于上述考虑, 我们采用非对称大光腔设计, 对应的 $d/\Gamma=1.17 \mu\text{m}$, 其中 d 是量子阱厚度, Γ 是量子阱的光场限制因子。图 1 为所采用的波导结构以及计算仿真的光场分布, 图 2 是垂直方向的远场分布结果。

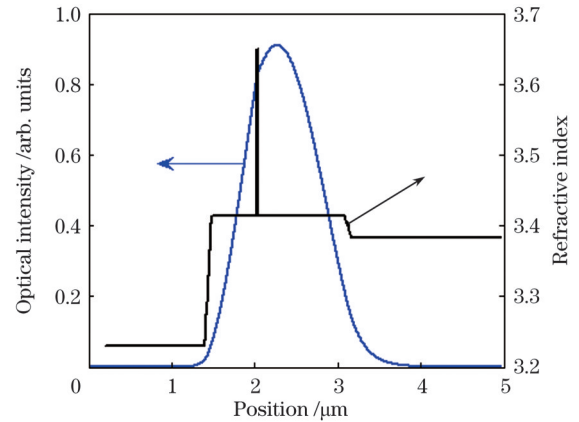


图 1 外延结构的折射率及光场分布的计算仿真结果
Fig. 1 Calculation and simulation results of refractive index and light field distribution of epitaxial structure

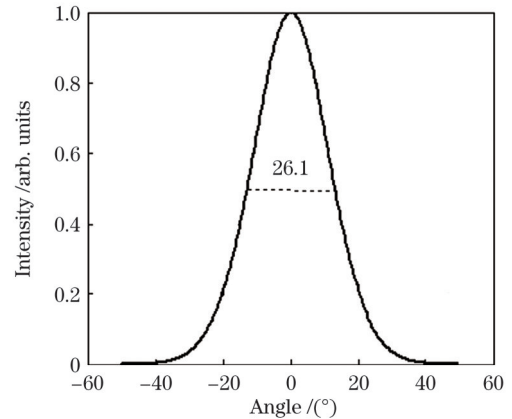


图 2 垂直方向远场分布计算结果
Fig. 2 Calculated vertical far-field distribution

外延波导结构设计完毕之后, 需要进行掺杂优化, 因为掺杂不仅影响芯片的串联电阻, 也影响激光谐振腔内损耗。由于芯片串联电阻与掺杂浓度呈负相关关系, 而内损耗与掺杂浓度呈正相关关系, 故掺杂优化的目的是找到最优的掺杂分布, 确保器件在给定的工作电流下有最高的功率转换效率。外延片主要材料参数如表 1 所示, 仿真计算结果表明, 掺杂优化后芯片的电阻率(不包括金属接触)为 $7.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 内损耗约为 0.41 cm^{-1} 。

外延材料与结构设计完成后, 我们进一步仿真优化了芯片性能参数与腔长、腔面反射率之间的关系。在仿真计算中假设: 1) 芯片以 P 面朝下的方式被焊接在 AlN 陶瓷基板上; 2) 陶瓷基板随后被焊接在 2 mm 厚

表 1 976 nm 外延片主要材料参数

Table 1 Main material parameters of 976 nm epitaxial wafer

Region	Material	Thickness / μm	Doping concentration / cm^{-3}
P-cap	GaAs	0.1	4×10^{19} for C
P-cladding	$\text{Al}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}$	1.2	2×10^{18} for C
P-waveguide	$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$	0.55	
Active region	InGaAs/AlGaAs	0.1	
N-waveguide	$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$	0.55	
N-waveguide	$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$	0.6	1×10^{17} for Si
N-cladding	$\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	1.80	1×10^{18} for Si
N-buffer	GaAs	0.7	2×10^{19} for Si

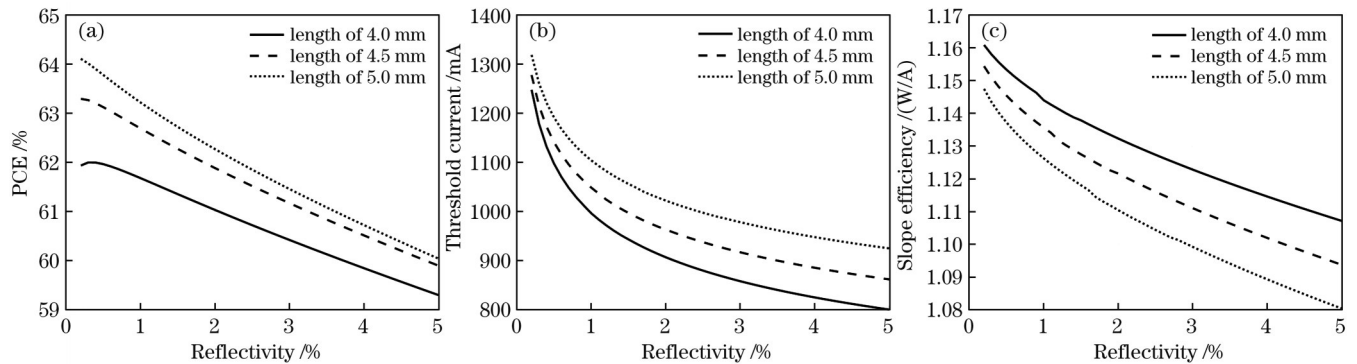


图 3 不同芯片腔长下芯片增透膜反射率对激光性能参数的影响。(a)PCE;(b)阈值电流;(c)斜率效率

Fig. 3 Influence of reflectivity of anti-reflection film on laser performance parameters at different chip cavity lengths. (a) PCE; (b) threshold current; (c) slope efficiency

3 材料生长及芯片制备与测试

外延材料采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法生长而成,生长工艺经过长时间的优化,确保了外延生长的准确性、稳定性,并满足外延材料具有低杂质含量、低缺陷密度等要求,最大限度地获得了极高的内量子效率。器件制备工艺则通过光学曝光定义波导为起点,随后进行波导制作、电接触窗口刻蚀、P面金属化、晶片减薄、N面金属化、快速退火等工艺处理。鉴于高功率半导体激光器的腔面处理与镀膜工艺对器件可靠性有至关重要的影响,我们采用特殊的腔面钝化镀膜工艺保证芯片的可靠性。膜系材料的选择首先需要考虑膜层材料的长期稳定性,防止环境气氛扩散至器件的发光区,因此采用 Si_3N_4 材料作为激光器的前腔面减反射膜,采用 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 多对组合膜作为后腔高反膜,膜层使用磁控溅射方法制备,膜层沉积速率为 $1.0 \sim 1.5 \text{ \AA/s}$,真空度为 $1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ ($1 \text{ Torr} \approx 133.322 \text{ Pa}$)。最终测试结果为:增透膜(AR)的反射率约为0.8%,高反膜(HR)的反射率约为98%。

芯片制作完毕后,首先将芯片以P面朝下的形式

的铜块上;3)铜块底部温度保持在 25°C 。在上述假设基础上,我们首先仿真计算了整个模块的热阻。热仿真结果表明,当激光芯片腔长为5 mm、发光条宽为 $200 \mu\text{m}$ 时,整个封装模块的热阻为 1.63 K/W 。然后利用上述热仿真的结果,我们仿真计算了芯片输出功率为25 W时,芯片腔长与腔面反射率对激光性能参数的影响,计算结果如图3所示。从计算结果来看,腔面反射率对阈值电流与斜率效率均有很大影响。当腔面镀膜反射率增大时,阈值电流减小,但斜率效率也减小。显然,对于任意给定的输出光功率,均存在一个最佳的腔面反射率。比如当腔长为4 mm时,最佳反射率大约为0.4%。尽管如此,在实际器件制作过程中,考虑到镀膜工艺的要求,我们将腔面反射率控制在不超过1%。对于5.0 mm腔长芯片,当输出光功率为25 W时,理论计算的最高功率转换效率可以达到64%的水平。

焊接在AlN陶瓷热沉上。图4为不同温度条件下以CW方式测试的光功率-电流(L-I)特性曲线以及对应的功率转换效率曲线。可以看出,封装到基座上的芯片(COS)在 25°C 测试环境下,阈值电流约为1.2 A,斜率效率在阈值电流附近约为 1.13 W/A ,最高电光转换

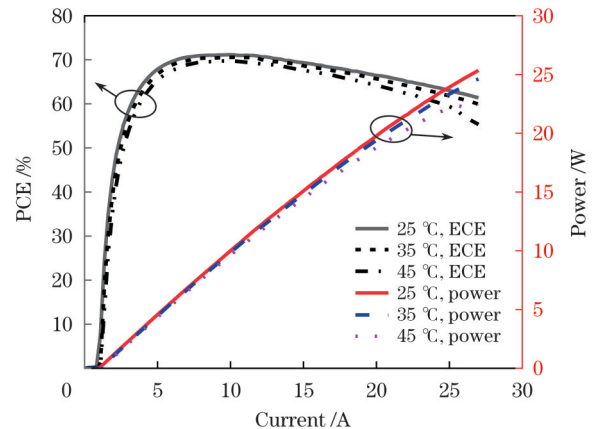


图 4 优化前的 COS 光功率与功率转换效率随工作电流的变化曲线

Fig. 4 Measured optical power and PCE versus operating current for COS before optimization

效率达到 70.8% (输出功率为 8.2 W), 26.9 A 电流下的输出功率达到 25 W, 功率转换效率为 60.8%; 在 45 °C 条件下, 26.5 A 时的输出功率下降至 22.5 W, 功率下降幅度为 10%。为了进一步提升芯片的输出功率及功率转换效率, 我们对外延结构的组分、厚度、掺杂进行了进一步优化。优化后在三个不同温度条件下, 以 CW 方式测试的 $L-I$ 特性曲线以及对应的功率转换效率曲线如图 5 所示, 可以看出, 在 26.5 A 电流下, 35 °C 时的输出功率达到 26.1 W, 45 °C 时的输出功率仍可达到 25 W, 相比 25 °C 时的输出功率 (26.8 W) 仅降低了 1.8 W, 功率下降幅度为 6.7%, 温度特性明显优于优化前。图 6 是优化前后器件的功率与电压随电流变化的曲线, 通过优化量子阱势垒高度减少了泄漏的载流子, 高电流下斜率效率的下降幅度明显减小。此外, 通过优化 P 型波导掺杂, 在不影响芯片电压的前提下, 进一步提高了芯片外量子效率。测试结果表明: 结构优化后器件的电压稍有增加, 但斜率效率在高电流下得到显著改善。优化后器件在 30 A 工作电流下的输出功

率为 29.4 W, 转换效率达到 61.3%, 最高功率转换效率达到 72.4%。与国内外的报道^[11-13]相比, 在相近发光条宽下, 优化后器件的功率和功率转换效率达到了国际一流水平。图 7 为优化后器件在 23 A 电流下 (对应的光功率为 25 W) 的远场分布, 95% 能量分布对应的垂直远场发散角为 48.8°。为了更精确地表征水平远场特性, 我们计算了任意给定远场角度所包含的光束能量占整体光束总能量的比例 (R), 计算结果如图 8 所示。可以看出, 对应于 95% 的能量占比, 水平远场发散角为 8.7°。如果考虑芯片耦合到数值孔径 (NA) 为 0.22 的光纤, 就水平远场而言, 耦合效率达 99.8% (耦合效率与慢轴发散角呈负相关)。图 9 为 23 A 电流下的光谱曲线, 封装后器件的波长约为 976 nm, 光谱半峰全宽 (-3 dB) 为 3.2 nm。

鉴于可靠性对大功率半导体激光器至关重要, 因此我们对所制作的 COS 器件进行了加速寿命测试。测试条件如下: 基板温度为 45 °C, 老化电流为 25 A (对应于 24 W 光功率输出), 工作模式为 CW。对 10 只 COS 器件进行了 2000 h 的加速寿命测试, 寿命测试

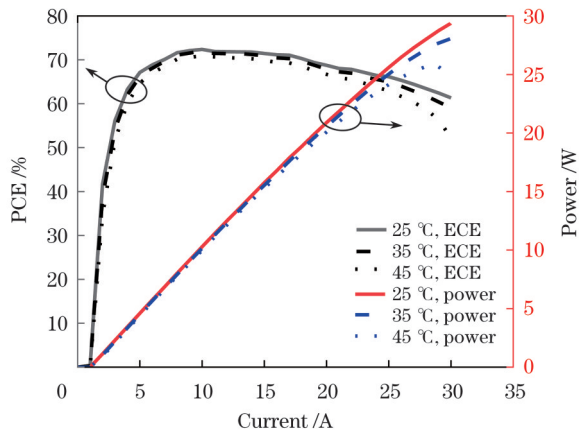


图 5 优化后的 COS 光功率与功率转换效率随工作电流的变化曲线

Fig. 5 Measured optical power and PCE versus operating current for COS after optimization

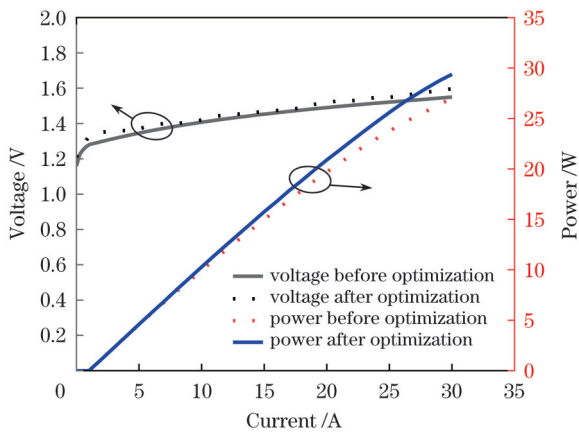


图 6 优化前后器件的功率与电压随电流的变化

Fig. 6 Power and voltage of device versus current before and after optimization

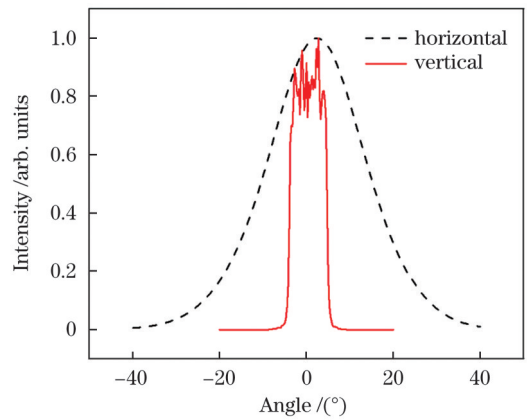


图 7 COS 在工作电流为 23 A 时的远场分布

Fig. 7 Measured far-field distributions of COS when operating current is 23 A

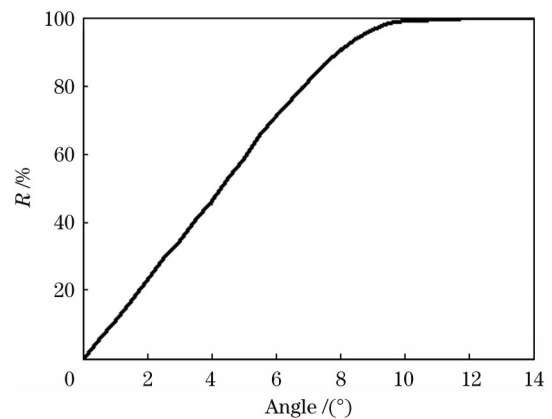


图 8 23 A 电流时不同慢轴远场发散角下的能量占比

Fig. 8 Energy ratios under different slow-axis far-field divergence angles at 23 A current

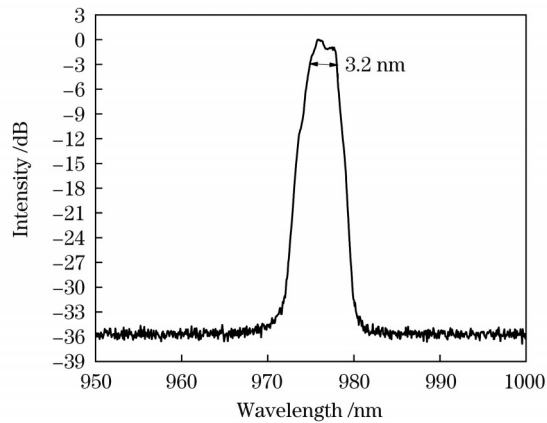


图 9 23 A 电流下的光谱曲线

Fig. 9 Measured spectrum at 23 A current

结果如图 10 所示。加速寿命测试结果表明,所有参与寿命测试实验的器件均无失效发生,且所有器件的输出功率变化在 2000 h 内均小于 5%,表明器件具有高的可靠性水平。

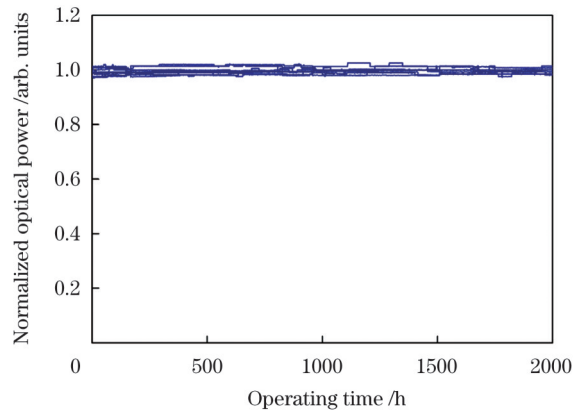


图 10 加速寿命测试功率监控曲线

Fig. 10 Power record curves in accelerated lifetime test

4 结 论

通过对半导体激光芯片的设计、材料的生长进行精心优化,制作了具有高效率、高可靠性的 976 nm 高功率半导体激光芯片。实验测试结果表明:所制作的器件在室温下的阈值电流大约为 1.0 A,斜率效率在阈值电流附近为 1.14 W/A,最高功率转换效率达到 72.4%(9 A 工作电流);当注入电流为 30 A、输出功率 29.4 W 时,功率转换效率高达 61.3%。长达 2000 h 的加速寿命测试结果显示,器件输出功率随时间的衰减率为每千小时小于 2.5%,表明所制作的激光芯片具有很高的可靠性水平。

参 考 文 献

[1] 杨永强,吴世彪,张越,等. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500012.
Yang Y Q, Wu S B, Zhang Y, et al. Application progress and

prospect of fiber laser in metal additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500012.

[2] 郭少锋,代小光,彭杨,等. 14 μm 芯径 2 kW 光纤振荡器及铜铜焊接试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2136002.
Guo S F, Dai X G, Peng Y, et al. Experimental research on 2 kW fiber oscillator with 14 μm core diameter and copper welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2136002.

[3] 刘潘. 2023 年中国光纤激光器行业发展现状及竞争格局分析,部分品牌逐步退出中国市场,国产设备厂商的市占率持续提升[EB/OL]. (2023-08-09)[2023-09-26]. <https://www.huaon.com/channel/trend/917154.html>.

[4] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.

[5] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.

[6] Morita T, Nagakura T, Torii K, et al. High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1502104.

[7] Crump P, Blume G, Paschke K, et al. 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 μm [J]. Proceedings of the SPIE, 2009, 7198: 719814.

[8] Bao L, Kanskar M, DeVito M, et al. High reliability demonstrated on high-power and high-brightness diode lasers[J]. Proceedings of the SPIE, 2015, 9348: 93480C.

[9] Kaifuchi Y, Yamagata Y, Nogawa R, et al. Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes[J]. Proceedings of the SPIE, 2017, 10086: 100860D.

[10] 胡海,仇伯仓,何晋国,等. 高性能 976 nm 宽条半导体激光芯片[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0801006.
Hu H, Qiu B C, He J G, et al. 976 nm wide-stripe semiconductor laser with high-performance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0801006.

[11] 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 the SPIE, 2019, 10900: 109000F.

[12] Liu Y X, Yang G W, Wang Z F, et al. High-power operation and lateral divergence angle reduction of broad-area laser diodes at 976 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107145.

[13] Liu Y X, Yang G W, Zhao Y M, et al. 48 W continuous-wave output from a high-efficiency single emitter laser diode at 915 nm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(22): 1218-1221.

[14] 陈芬,崔碧峰,冯靖宇,等. 大功率半导体激光器光束质量的研究与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2100002.
Chen F, Cui B F, Feng J Y, et al. Research and progress of high power semiconductor lasers with high beam quality[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2100002.

[15] Petrescu-Prahova I B, Modak P, Goutain E, et al. High d/gamma values in diode laser structures for very high power[J]. Proceedings of the SPIE, 2009, 7198: 71981I.

[16] Bacchin G, Fily A, Qiu B, et al. High temperature and high peak-power 808 nm QCW bars and stacks[J]. Proceedings of the SPIE, 2010, 7583: 75830P.

[17] Liu Y X, Ebadi K, Sunnetcioglu A K, et al. Elimination of catastrophic optical mirror damage in continuous-wave high-power laser diodes using multi-section waveguides[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 31539-31549.

[18] Levy M, Karni Y, Rapaport N, et al. Development of asymmetric epitaxial structures for 65% efficiency laser diodes in the 9xx-nm range[J]. Proceedings of the SPIE, 2010, 7583: 75830J.

Design and Fabrication of High-Efficiency and High-Power 976 nm Semiconductor Laser Chips

Fu Peng¹, Zhang Yanchun², Zhao Tao^{1*}, Zhao Yongming², Tang Song², Li Ying², Han Shendan¹

¹Guangdong Advanced Technology Institute Co., Ltd., Guangzhou 510535, Guangdong, China;

²Dogain Optoelectronic Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215124, Jiangsu, China

Abstract

Objective High-power semiconductor laser diodes emitting at approximately 976 nm are in high demand in Yb-doped fiber lasers (YDFL) because YDFLs exhibit strong absorption peaks at approximately 976 nm. Specifically, the absorption cross section is as strong as three times that at a wavelength of approximately 915 nm. Thus, by using lasers with an emission wavelength of approximately 976 nm for optical pumping, the length of the active fiber can be significantly shortened, leading to cost savings and reduced nonlinear effects. With the ongoing advancements in various industrial applications, the emitting power of high-power lasers increases from 12 W (about 10 years ago) to approximately 30 W. Beyond the high-power requirement, one of the most sought-after features of high-power lasers is their power conversion efficiency (PCE). A superior PCE results in higher optical power emission, enhanced reliability, and reduced system costs.

In this study, we demonstrate the design and fabrication of high-efficiency, high-power 976-nm lasers. The tests on our fabricated devices show that, at room temperature and under the continuous-wave (CW) operation condition, the power conversion efficiency (PCE) reaches as high as 72.4% when the injection current is 10 A. However, the efficiency decreases to 61.3% when the current rises to 30 A, at which the operating power is 29.4 W.

Methods The epitaxy material is grown using the metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) method, and the structure contains an 8-nm-thick In_{0.175}GaAs single quantum well (SQW) sandwiched between two separate confinement heterostructure (SCH) Al_{0.17}GaAs layers. A wide optical cavity waveguide design is employed to reduce power density and cavity loss. The total thickness of the SCH layers is 1.5 μm. N- and P-doping are optimized to ensure the lasers produce the highest PCE when the emitting power is 25 W. Figure 1 shows the refractive index profile of our material structure, and Table 1 lists the detailed material structure.

After designing the material structure, we proceed with the optimization process to determine the optimum cavity length and anti-reflection (AR) reflectivity. In our optimization, we assume the aperture width is 200 μm, and the laser chip is mounted onto 350-μm-thick AlN ceramics in a P-side down manner, which, in turn, is mounted onto a copper block. Figure 3 displays the dependence of the laser parameters on the cavity length and the AR reflectivity. Based on this, it is clear that when the cavity length is in the range of 4–5 mm, a longer cavity yields better efficiency because the long cavity has a smaller series resistance and thermal impedance. Based on the theoretical simulation, we choose the cavity to be 5-mm-long, and the AR reflectivity is approximately 1%.

We conduct several material growth iteration processes to investigate the effect of growth conditions on device performance. Figure 4 shows the test results before growth optimization. In the figure, it can be observed that when tested at ambient temperature of 25 °C under the CW condition, the chip on sub-mount (COS) threshold current is approximately 1.2 A, slope efficiency is approximately 1.13 W/A, maximum PCE is 70.8% (corresponding optical power is 8.2 W). To further improve the device performance, we conduct growth optimization by optimizing the Al mole fractions for different layers in the structure, doping, and layer thickness.

Results and Discussions The test results for the devices before and after growth optimization are shown in Fig. 6. Figure 5 shows the light-current curves and power conversion efficiencies under different test temperatures for chips with growth optimization. The highest PCE is 72.4% at a current of approximately 10 A. The efficiency reduces to 61.3% when the current reaches 30 A (the corresponding optical power is 29.4 W). Our devices appear to perform even better than those published in the literature. Figures 8 and 9 show the energy ratios under different slow-axis far-field divergence angles and lasing spectrum, respectively. In Fig. 8, it can be observed that more than 95% of the optical power is within horizontal far-field divergence angle of 9°, indicating good beam quality. The reliability, which is of critical importance for real-world applications, is also carefully evaluated by placing a number of devices in an accelerated lifetime test (Fig. 10). Based on the lifetime test, there is no observable power degradation after 2000 h accelerated testing at an elevated temperature of 45 °C.

Conclusions In summary, we demonstrate the design and fabrication of high-efficiency, high-power 976-nm lasers. These devices are reliable and efficient. The PCE is as high as 72.4% at a current of 10 A; however, the efficiency decreases to 61.3% when the current reaches 30 A.

Key words lasers; semiconductor laser chips; high electro-optical conversion efficiency; high power; low level far-field divergence angle; 976 nm