

高功率 793 nm 半导体激光器

周坤^{1,2}, 何林安^{1,2}, 李弋^{1,2}, 贺钰雯^{1,2}, 张亮^{1,2}, 胡耀^{1,2}, 刘晟哲^{1,2},
杨鑫^{1,2}, 杜维川^{1,2*}, 高松信^{1,2}, 唐淳^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院高能激光重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对掺铥光纤激光器泵浦源的需求, 研制了波长为 793 nm 的高功率半导体激光芯片和尾纤耦合模块。激光器外延采用了非对称大光腔的波导结构, 降低了模式损耗, 波导采用无铝的 GaInP 材料, 结合真空解理钝化工艺提高了腔面损伤阈值。通过外延结构和腔面镀膜优化, 研制的激光器单管输出功率达到 12 W@11A, 在输出功率 8 W 时通过了 300 h 老化测试。采用 7 只单管制备了尾纤耦合模块, 耦合至 100 μm NA. 0. 22 光纤中, 输出功率为 40 W@7A, 电-光效率为 49. 5%@40 W。

关键词: 半导体激光器; 793 nm; 真空解理; 空间烧孔
中图分类号: O436 **文献标识码:** A

High power 793 nm diode lasers

ZHOU Kun^{1,2}, HE Lin-An^{1,2}, LI Yi^{1,2}, HE Yu-Wen^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}, HU Yao^{1,2},
LIU Sheng-Zhe^{1,2}, YANG Xin^{1,2}, DU Wei-Chuan^{1,2*}, GAO Song-Xin^{1,2}, TANG Chun^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;
2. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: To satisfy the need of Thulium-doped fiber laser pump source, 793 nm high-power semiconductor laser emitters and fiber-coupled module were developed. The laser epitaxy adopts the large asymmetric optical cavity waveguide structure to reduce the mode loss. The waveguide adopts aluminum free GaInP material which improves the facet damaged threshold combined with vacuum cleavage passivation process. Through the optimization of epitaxial structure and facet coating, the output power of the developed laser reaches 12 W@11A, passed the 300 h aging test of 8 W. Seven single emitters were space coupled to 100 μm 0. 22 NA fiber modules. The output power of the model is 40 W@7A, and the electro-optical efficiency is 49. 5% @ 40 W.

Key words: semiconductor lasers, 793nm, facet reflectivity, longitude spatial hole burning
PACS: 42.55.-f

引言

掺铥光纤激光器在医学、超快光学、眼睛安全、近距离遥感和远程探测系统等方面具有非常良好的应用前景, 已经成为人眼安全波长领域光纤激光器的研究热点^[1-3]。采用 793 nm 的泵浦源可制备发光波长在 1. 9~2. 1 μm 波段的掺铥光纤激光器, 目前输出功率已经达到了 kW 的量级, 并具有较高的

效率^[4]。相比于 9xx nm 波段, 要获得高可靠性、高亮度的 793 nm 波段的半导体激光器泵浦源具有更高的挑战, 主要面临的问题是效率更低、腔面更容易出现失效。美国 nLIGHT 公司早在 2011 年报道了输出功率 10 W、电-光效率可达 60% 的 786 nm 半导体激光器, 其条宽为 200 μm , 并通过了数千小时的加速寿命考核实验^[5]。美国相干 (Coherent) 公司在

收稿日期: 2022-01-21, 修回日期: 2022-06-19

Received date: 2022-01-21, Revised date: 2022-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 (11804322), 中国工程物理研究院创新发展基金 (C-2020-CX2019035)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11804322), the Innovation and Development Fund of CAEP (C-2020-CX2019035)

作者简介 (Biography): 周坤 (1987-), 男, 四川巴中人, 副研究员, 博士, 主要研究领域为半导体激光器. E-mail: 17764988391@126.com
*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: weichuandu@126.com

2020年报道了连续工作下输出功率5.6 W、效率60.3%的100 μm 条宽的793 nm半导体激光器^[6],并采用T-bar的方案将激光耦合至225 μm 0.22 NA的光纤,输出功率达到了150 W,电-光效率47.3%^[7]。在该波段,国内研究机构多集中于后端光学系统设计^[8],对激光器外延设计、生长以及制备工艺的报道相对较少^[9]。因此,针对国内对793 nm大功率半导体激光器的需求,开展国产化研究势在必行。

本文设计并制备了基于GaAsP/GaInP无铝材料体系的793 nm半导体激光器和尾纤耦合模块。在外延方面,通过非对称大光腔的波导结构设计降低了模式损耗,提高了器件斜率效率,器件具有较高的特征温度。在工艺方面,通过腔面真空解理钝化工艺提高了腔面损伤阈值,优化了腔面镀膜的反光率抑制了空间烧孔效应,提高了电-光转换效率。研制的激光器单管输出功率达到12 W@11 A,在输出功率8 W时通过了300 h老化测试。采用7个单管制备了尾纤耦合模块,耦合至100 μm 0.22 NA光纤中,输出功率为40 W@7 A,电-光效率为49.5%@40 W。

1 外延设计

采用非对称大光腔外延波导结构的设计,量子阱为GaAsP应变量子,波导层采用无铝的GaInP材料,限制层采用AlGaInP材料。图1(a)是波导总厚度为1.55 μm 时外延结构的折射率及光场分布。本研究中采用了非对称厚度的波导结构,量子阱的位置偏向P型层,目的是使模场分布偏向N型层,降低空穴对光的吸收,从而降低模式损耗(其中波导是非掺杂的)。同时,厚度较薄的P型波导不但降低串联电阻,更利于降低器件P面向下封装时的热阻。通过优化量子阱的位置保证了激光器基模的稳定激射,抑制了高阶模。外延材料采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统在偏向 $\langle 111 \rangle$ 晶向 10° 的N型GaAs(100)单晶衬底上生长。

外延片生长完成后,采用湿法腐蚀工艺制成100 μm 宽条激光器,通过电子束蒸镀 SiO_2 绝缘膜,制备电注入窗口区,同时形成弱折射率限制。P面金属电极依次为Ti/Pt/Au,N面金属电极为Ni/AuGe/Pt/Au。图1(b)中是解理腔长为4 mm的激光器未镀膜时在短脉冲条件下测试的PI曲线,其中输出功率值为两个端面功率的和。图中对比了两种波导厚度外延结构的输出功率,可以看出波导厚度的增加能有效提升器件的斜率效率。

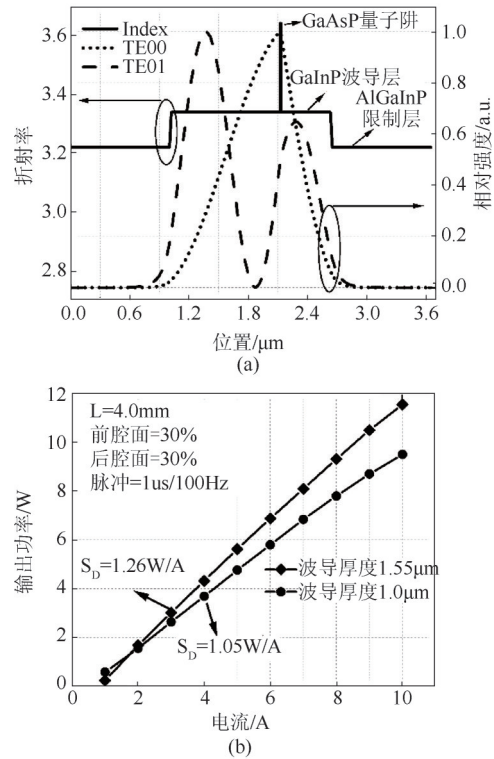


图1 非对称大光腔外延波导结构设计(a)模场分布计算,(b)波导厚度对斜率效率的影响

Fig. 1 Design of the asymmetric large optical cavity epitaxial structure: (a) Mode calculation results, (b) influence of the waveguide thickness on the slope efficiency

对1.55 μm 的大光腔波导的掺杂进行优化,如图2(a)所示。当波导进行掺杂时外延结构的模式损耗增大,同时内量子效率增加。这是由于波导的掺杂降低了载流子的泄露,有利于提高内量子效率,但掺杂引起的自由载流子损耗增加,所以模式损耗增大。从图中可以看出,当器件腔长大于3 mm时,波导不掺杂时外量子效率更高,而当腔长较短时波导掺杂时的外量子效率更高。利用制备的4 mm腔长器件,通过改变热沉的温度,在短脉冲电注入条件下测试了特征温度,如图2(b)所示。阈值的特征温度 T_0 为155 K,斜率效率的特征温度 T_1 为641 K,这说明了外延结构具有较好的载流子限制,同时说明该结构能够适应相对较高的工作温度。

2 器件设计与制备

为了制备高可靠性793 nm半导体激光器,采用超高真空解理机制成厘米巴条,真空度 1×10^{-11} Torr,并在前后腔面分别蒸镀无定形ZnSe钝化层,然后利用电子束镀膜机分别蒸镀反射率1%~5%的增透膜和99%的高反膜。最后解理成单管,P面向下焊接

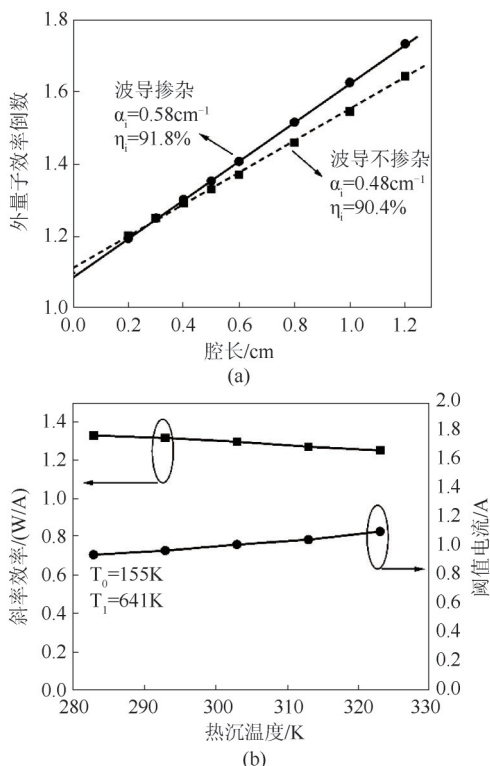


图2 波导掺杂优化与特征温度测试(a)波导掺杂优化,(b)特征温度测试

Fig. 2 Optimization of waveguide doping and test results of characteristic temperatures (a) Optimization of waveguide doping, (b) test results of characteristic temperatures

在COS热沉上。

2.1 器件结构优化

图3(a)是腔长为2 mm的激光器在连续电流注入下测试的功率和效率曲线,测试热沉温度为25℃。可以看出,器件在3.5 A左右达到60%的电光效率,但由于腔长短、热阻大容易出现热饱和,在注入电流8 A时效率下降至54%,限制了输出功率的进一步提高。图3(a)同时给出了未采用真空解理钝化(大气解理)的器件输出功率曲线,可以看出器件在3 A便出现了腔面失效。采用超高真空解理和ZnSe钝化膜保护腔面抑制了半导体激光器腔面的吸附水汽、铝和砷氧化物及发生化学反应等效应,因此提高了COD阈值^[10]。图3(b)给出了器件在注入电流8 A时的快慢轴发散角测试结果,快轴发散角约为47°,慢轴发散角为8°(95%能量)。

为了提高器件的输出功率,将腔长增加至4 mm。由于腔长增加,空间烧孔效应增强^[11],沿谐振腔方向光功率的分布非对称性增强,导致后腔面载流子浓度高,器件斜率效率降低,可通过优化腔面反射率抑制空间烧孔效应,在较高的电流下保持较高的

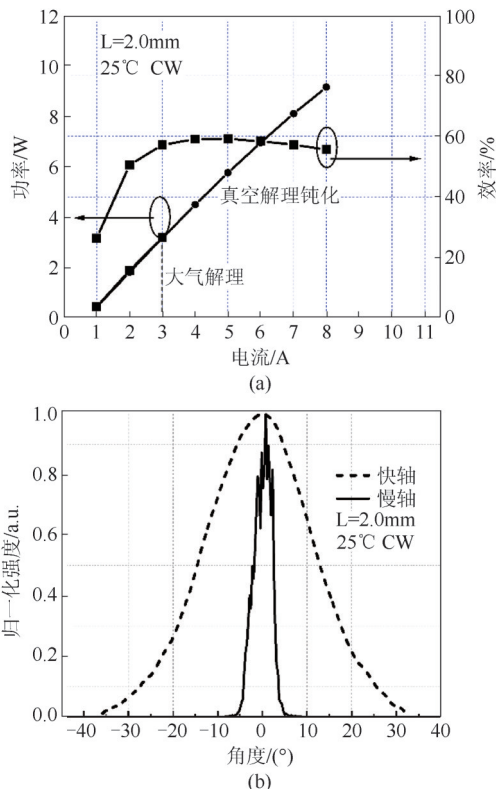


图3 腔长为2 mm的单管测试结果(a) P - I 和效率曲线,对比了大气解理和真空解理腔面COD,(b)远场发散角测试曲线
Fig. 3 Test results of the 2 mm long single emitter (a) P - I and efficiency curve, (b) far-field curve

斜率效率。图4(a)给出了未封装时未镀膜、抑制空间烧孔前、抑制空间烧孔后在短脉冲下的功率曲线。图4(b)是优化后的单管在连续电流下的功率和效率测试结果,器件在注入电流5.5 A左右达到60%的电-光转换效率,输出功率可以达到12 W@11 A,在12 W时的电-光效率约为56%。

2.2 可靠性测试

虽然制备的793 nm单管输出功率可达到12 W,但为了提高器件使用寿命,将输出功率确定在8 W左右。图5是将注入电流固定在8 A对单管进行了老化测试,测试热沉温度为25℃。可以看出,测试300 h无失效发生。由于采用了4 mm腔长,较低的热阻降低了器件的结温,同时采用真空解理钝化抑制了腔面COD失效,保证了器件的长期可靠性。

2.3 尾纤模块测试结果

采用7只4 mm腔长的单管串联研制了尾纤耦合模块,尾纤的参数为100 μm 0.22 NA。在注入电流为7 A时输出功率达到了40 W,此时电光效率约49%,测试结果如图6(a)所示。图6(b)是40 W输出时的光谱,其中心波长为792.6 nm,半高全宽为3.8

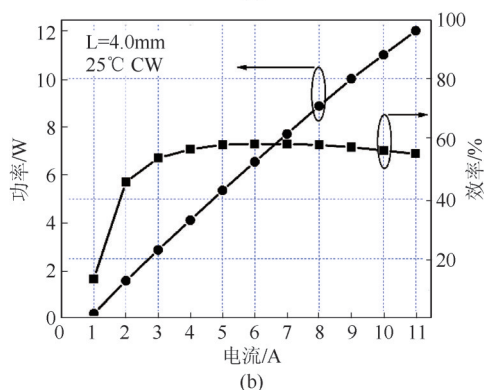
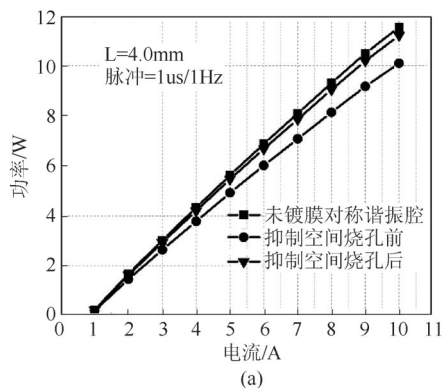


图4 腔长为4mm时单管性能优化(a)通过腔面反射率抑制空间烧孔效应,(b)优化后的单管连续电流测试结果

Fig. 4 Improvement of the 4 mm long single emitter (a) suppression of the spatial hole burning effect by optimization of front facet reflectivity, (b) CW power and efficiency test results of the optimized emitter

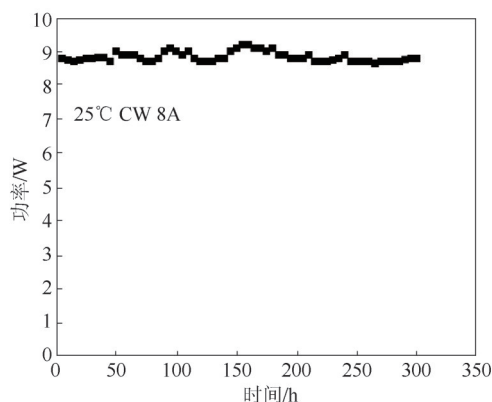


图5 4 mm腔长单管可靠性测试结果

Fig. 5 Reliability test results of the 4 mm long single emitter

nm。对尾纤模块进行了可靠性测试,测试时间为100 h,如图7(b)所示,测试过程中功率无衰减。

3 结论

采用非对称大光腔的波导结构和无铝的

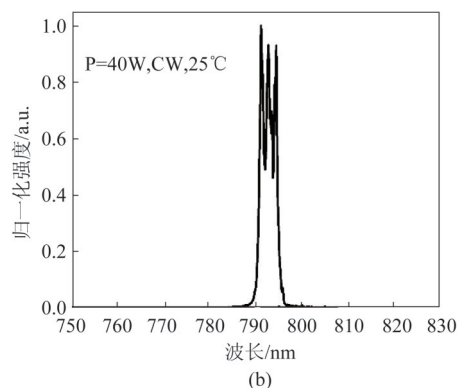
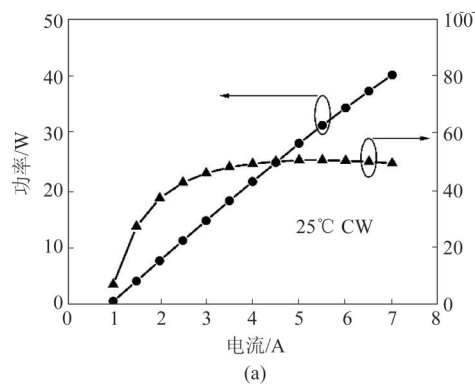


图6 尾纤耦合模块功率和光谱测试结果

Fig. 6 Power and spectra test results of the fiber coupling module

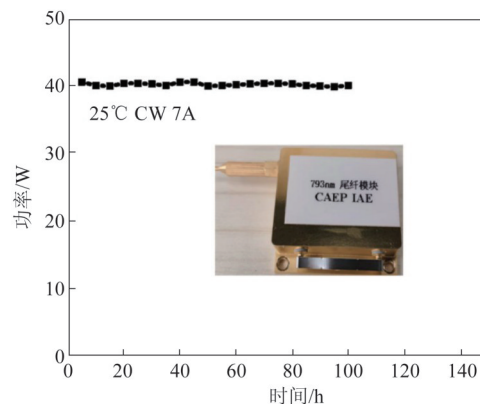


图7 尾纤耦合模块可靠性测试结果

Fig. 7 Reliability test results of the fiber coupling module

GaAsP/GaInP 材料,结合真空解理钝化工艺和腔面反射率的优化,研制了波长为793 nm的高功率半导体激光芯片,并制备了尾纤耦合模块。其中激光器单管输出功率达到12 W@11A,在输出功率8 W时通过了300 h老化测试。尾纤耦合模块输出功率为40 W@7A,电-光效率为49.5%@40 W(光纤参数100 μm NA. 0.22)。上述研究结果可很好满足掺铋光纤激光器泵浦源的国产化需求。

References

- [1] HAN Wen-Guo, YAN Feng-Ping, FENG Ting, *et al.* High-power thulium-doped fiber laser and its application in biological tissue cutting [J]. *Chinese Journal of Luminescence* (韩文国, 延凤平, 冯亭, 等。高功率掺铥光纤激光器及其在生物组织切割中的应用. *发光学报*), 2021, **42**(5):9.
- [2] TAO Meng-Meng, TAO Bo, YE Jing-Feng, *et al.* Linewidth compression of tunable Tm-doped fiber laser and its hyperspectral absorption application [J]. *Acta Phys. Sin.*, (陶蒙蒙, 陶波, 叶景峰, 等。可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用. *物理学报*, 2020, **69**(3):034205.
- [3] LI Ya-Fan, LIU Kun, LIU Te-Gen, *et al.* Intracavity gas sensing system based on thulium fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica* (李亚凡, 刘琨, 刘铁根, 等。基于掺铥光纤激光器的内腔气体传感系统研究. *光子学报*), 2021, **50**(9):8.
- [4] LIU Yin-Zi, XING Ying-Bing, LIAO Lei, *et al.* 530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser [J]. *Acta Phys. Sin.* (刘茵紫, 邢颖滨, 廖雷, 等。530 W 全光纤结构连续掺铥光纤激光器. *物理学报*, 2020, **69**(18):7.
- [5] Bao L, Wang J, Devito M, *et al.* Performance and reliability of high power 7xx nm laser diodes [C]. Proceedings-of-SPIE 2011, San Francisco, United States, 2011. doi: 10.1117/12.875842
- [6] Liu G L, Lehtonen S, Li J W, *et al.* High power and reliable 793nm single emitter and T-bar for thulium-doped fiber laser pumping [C]. Proceedings-of-SPIE 2020, San Francisco, United States, 2020. doi: 10.1117/12.2547345
- [7] Ebert C, Guiney T, Irwin D, *et al.* New advancements in 793 nm fiber-coupled modules for Th fiber laser pumping, including packages optimized for low SWaP applications [C]. Proceedings-of-SPIE 2016, Baltimore, United States, 2016. doi: 10.1117/12.2223127
- [8] TIAN Jing-Yu, ZHANG Jun, PENG Hang-Yu, *et al.* 780 nm diode laser source with narrow linewidth for alkali metal vapor laser pumping [J]. *Chinese Journal of Luminescence* (田景玉, 张俊, 彭航宇, 等。用于碱金属蒸汽激光器泵浦的窄线宽 780 nm 半导体激光源. *发光学报*), 2019, **40**(9):1123-1129.
- [9] HE Lin-An, ZHOU Kun, ZHANG Liang, *et al.* Fabrication of high-power semiconductor laser with wavelength-locked at 780 nm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*. (何林安, 周坤, 张亮, 等。大功率 780nm 半导体激光器的设计与制备. *强激光与粒子束*), 2021, **33**(9):1-5
- [10] Ressel P, Erbert G, Zeimer U, *et al.* Novel passivation process for the mirror facets of Al-free active-region high-power semiconductor diode lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(5):962-964.
- [11] DU Wei-Chuan, GAO Song-Xin, WU De-Yong, *et al.* Optimization of Facet Reflectivity of 450-nm GaN-Based Semiconductor Lasers [J]. *Acta Optica Sinica* (杜维川, 高松信, 武德勇, 等。450 nm GaN 基半导体激光器腔面反射率的优化. *光学学报*), 2019, **39**(6):4.