

文章编号: 1000-7032(2026)04-0665-07

890 nm 大功率半导体激光泵浦源性能优化

苑高辉^{1,2}, 周寅利^{1*}, 张建伟¹, 陈超¹, 张卓¹, 刘天娇¹, 张天琪^{1,2},
高晓燕^{1,2}, 曹玉^{1,2}, 姜悦晨^{1,2}, 张继业¹, 宁永强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 特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大功率半导体激光器作为固体、光纤激光系统的核心泵浦源, 在工业加工、国防等领域具有重要的应用价值。本文报道了一种用于满足中红外光纤激光系统的泵浦激光器。作为光纤激光器的泵浦源, 要求器件具有高输出功率、高效率的特点, 并能够具有很好的寿命和可靠性。本文采用高带阶的 InGaAs/GaAsP 量子阱材料, 提高了载流子限制能力, 设计了非对称波导结构并采用渐变掺杂技术降低了载流子吸收损耗和串联电阻, 最终制备的 200 μm 脊宽的单管激光器输出功率达到 16.12 W, 最大转换效率为 53%; 采用 10 个单管制备的激光器模块耦合至 105 μm 0.18 NA 光纤中, 最大输出功率为 113 W。测试结果表明, 激光器具有较高的功率和温度稳定性, 提升了激光器的可靠性。

关键词: 半导体激光器; 高功率; 转换效率; 可靠性

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250266

CSTR: 32170.14.CJL.20250266

Performance Optimization of High-power 890 nm Semiconductor Laser Pump Sources

YUAN Gaohui^{1,2}, ZHOU Yinli^{1*}, ZHANG Jianwei¹, CHEN Chao¹, ZHANG Zhuo¹, LIU Tianjiao¹,
ZHANG Tianqi^{1,2}, GAO Xiaoyan^{1,2}, CAO Yu^{1,2}, JIANG Yuechen^{1,2},
ZHANG Jiye¹, NING Yongqiang¹, WANG Lijun¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhouyinli@ciomp.ac.cn

Abstract: High-power semiconductor lasers, as core pumping sources for solid-state and fiber laser systems, are of significant application value in the fields such as industrial processing and national defense. This paper reports on a pump laser developed to meet the requirements of mid-infrared fiber laser systems. As a pump source for fiber lasers, the device must possess high output power and high efficiency. By optimizing quantum well materials, waveguide structures, and doping profiles, a single-emitter laser with a 200 μm stripe width was fabricated, achieving an output power of 16.12 W and a maximum conversion efficiency of 53%. Through beam combining and coupling modules, the laser was coupled into a 105 μm optical fiber with a numerical aperture (NA) of 0.18, delivering a maximum output power of 113 W. Test results indicate that the laser exhibits excellent power and temperature stability, thereby enhancing its reliability.

Keywords: semiconductor laser; high power; conversion efficiency; reliability

收稿日期: 2025-12-03; 修订日期: 2025-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(62090061, 62334009, 52172165, 62274165, 62304224); 吉林省与中国科学院科技合作项目(2024SY-HZ0007); 吉林省科技发展计划项目(20240302026GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62090061, 62334009, 52172165, 62274165, 62304224); Jilin Province-Chinese Academy of Sciences Science and Technology Cooperation Project (2024SYHZ0007); The Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan (20240302026GX)

1 引 言

宽区半导体激光器具有大功率、高转换效率、体积小及高可靠性的优点,在信息技术、泵浦、材料加工、激光医疗等领域具有广泛应用^[1-4]。其中,890 nm 半导体激光器作为中红外光纤激光系统的核心泵浦源,具有重要的应用前景。泵浦源的输出特性直接影响光纤激光系统的输出功率、能耗等。因此,为了实现光纤激光系统的高性能输出,对半导体激光泵源的功率与效率提出了更高的要求^[5]。

针对大功率、高效率的目标,器件在量子阱和波导结构上需具备高增益、低损耗的特点,同时激光器的腔面需承受较高的功率密度。为了实现高效率,器件整体结构需要具备低电阻、低热阻。而高效率的前提首先是量子阱结构具备高效的载流子限制能力,防止载流子泄漏。在芯片材料的选择上,应尽可能控制芯片的非辐射复合等其他损耗,同时降低材料自身的热阻与电阻,提高转换效率。近红外波段的半导体激光器结构中常采用高铝组分材料作为波导层和包层,部分波段的有源区也采用含铝组分材料用于提高载流子限制能力。然而,随着 Al 组分的增加,载流子迁移率明显下降,导致器件热阻明显增大,载流子注入效率降低;并且高铝组分材料在外延生长及腔面解理时容易被氧化形成缺陷,导致低的灾变光损伤阈值功率,极大地降低器件寿命。因此,实现器件大功率工作的同时,提升转换效率、延长使用寿命、提高器件的可靠性是目前研究的新挑战^[6-9]。

为了解决传统 GaAs/AlGaAs 材料高热阻、低载流子注入效率的问题,科研工作者们提出了许多新方案。Nagase 等^[10]制备了 AlAs/In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs_{0.56}Sb_{0.44} 双势垒有源区结构,通过高 Sb 组分的 AlAsSb 外势垒能够补偿 AlAs 内势垒层所产生的晶格失配,从而降低有源区的界面粗糙度,使得载流子限制能力得到增强。为了提高有源区辐射复合率,Levon 等^[11]制备了 Ga_{0.55}In_{0.45}P/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/In_{0.22}Al_{0.42}Ga_{0.36}As 双势垒有源区结构,相比传统 AlGaAs 势垒,载流子有效势垒高度提高了 219 meV,阻碍了载流子向波导层泄漏,有源区辐射复合效率更高,器件稳定性和可靠性更好。由此可见,通过提高载流子有效势垒高度、补偿有源区晶格失配,可形成高质量的晶体界面,进而实现载流子的精准限制,有效降

低载流子损耗,最终显著提升激光器的输出功率与电光转换效率。因此,设计能够抑制载流子泄漏的新型有源区外延结构已成为大功率 GaAs 基半导体激光器研制进程中亟待解决的核心科学问题。

针对大功率、高效率以及高可靠性的目标,本文设计并制备了具有高应变、高带阶的 InGaAs/GaAsP 无铝材料量子阱体系的 890 nm 半导体激光器和光纤耦合模块,相较于传统含铝组分材料,从根本上避免了有源区的铝组分,大幅降低了缺陷密度和非辐射复合率,从而提升了内量子效率;晶格质量的提升使得器件的热导率也得到明显优化,为高可靠性奠定了物理基础。在外延方面,通过非对称波导结构设计降低了吸收损耗,提高了器件光电转化效率。在工艺方面,通过腔面真空解理工艺以及沉积 ZnSe 钝化膜保护腔面,提高了腔面损伤阈值^[12]。研制的激光器单管在室温下连续输出功率达 16.12 W,最大转换效率为 53%,采用 10 个单管制备的激光器模块,耦合至 105 μm 0.18 NA 光纤中,输出功率为 113 W,并且系统研究了激光器在不同温度下的阈值电流、斜率效率、远场发散角等特性。

2 实 验

2.1 外延结构设计

半导体激光器的外延结构与优化是半导体激光器领域最核心的部分,是实现高性能输出的必要条件,需要系统地进行优化,包含量子阱材料优化、波导结构优化和掺杂优化。对于大功率半导体激光器,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载流子泄露,以及高光功率密度会造成腔面光学灾变损伤^[13]。为了提高灾变光损伤阈值功率,通过腔面真空解理钝化工艺,实现最高的腔面钝化质量,抑制灾变光腔镜损伤,并且采用非对称的大光腔波导结构增大光模式尺寸,降低功率密度,提高了灾变光损伤阈值功率。通过调节量子阱位置及非对称波导优化设计,适当降低光限制因子,抑制光与载流子相互作用,从而抑制器件的纵向空间烧孔效应。设计的非对称波导结构量子阱的位置偏向 p 型区域,厚的 n 侧波导使光场尽量偏向 n 型区域,降低与空穴分布区的交叠,减少内部载流子吸收损耗。由于空穴的迁移率远小于电子的迁移率,p 面波导层的厚度小于 n 面波导也有利于降低串联电阻,获得

更高的电光转换效率,提高输出功率。图 1 所示为优化的激光器折射率分布和光场分布。

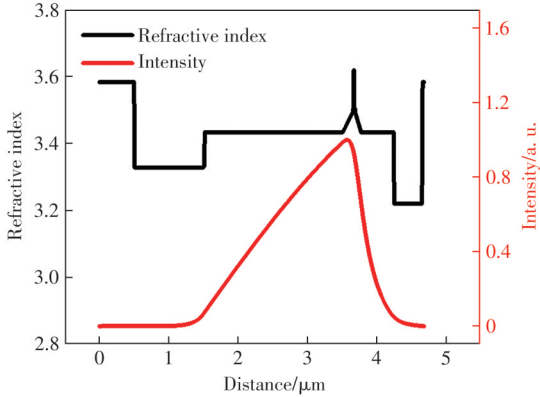


图 1 激光器折射率分布和光场分布

Fig.1 Refractive index and optical field distribution diagram

高电流注入下结温升高引起载流子泄露,导致输出功率饱和是影响激光器功率指标的另外一个重要因素。载流子在量子阱能级中的占据特性随温度变化而改变,当激光器工作在大电流条件下,有源区温度升高会显著增加载流子从量子阱逃逸的概率,从而导致参与辐射复合的载流子数量减少,增大光损耗,引发材料增益衰减、阈值电流提高、斜率效率降低等问题,导致输出功率饱和。针对这一问题,通过合理提高量子阱与势垒材料的能带势垒高度,可有效抑制载流子泄露,同时降低其在波导层的非辐射复合损耗^[9]。因此,本文采用具有高带阶的 InGaAs/GaAsP 量子阱材料体系,如图 2 所示。导带带阶随着 P 组分的增加而增加,对于 GaAs_{0.98}P_{0.02} 势垒,其导带带阶仅

为 13 meV;而当势垒为 GaAs_{0.88}P_{0.12} 时,导带带阶增加到 81 meV,这种导带带阶的增加将极大地增加量子阱对载流子的限制作用,最终提高器件的光电转换效率。

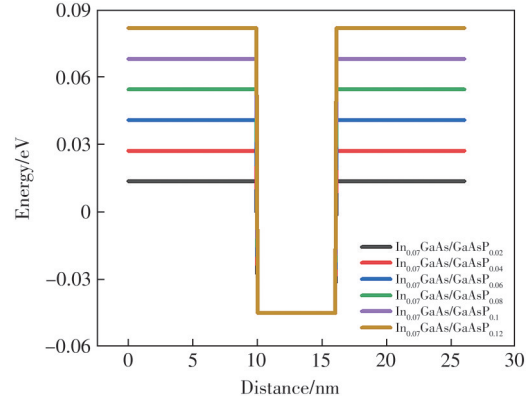


图 2 InGaAs/GaAsP 量子阱的导带能级随 P 组分的变化
Fig.2 Variation of the conduction band energy level in InGaAs/GaAsP quantum wells with P composition

In 组分含量需要根据所采用的量子阱厚度以及势垒层 P 的含量作必要的调整,势垒材料 GaAsP 中 P 的含量对器件的性能有重要影响,高的 P 组分可以确保器件在高温运行时有足够高的载流子限制能力进而提高增益。但是,过高的 P 含量会因晶格失配而导致晶体缺陷激增、发光效率骤降、器件性能发生恶化,通过精确控制 In 组分和 P 组分,可在发射波长、载流子限制能力和晶体质量三者之间找到最优平衡点。如图 3 所示,根据上述原则,采用了 6 nm 厚的 In_{0.07}Ga_{0.93}As/GaAs_{0.88}P_{0.12} 量子阱结构,波导层采用 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 材料。

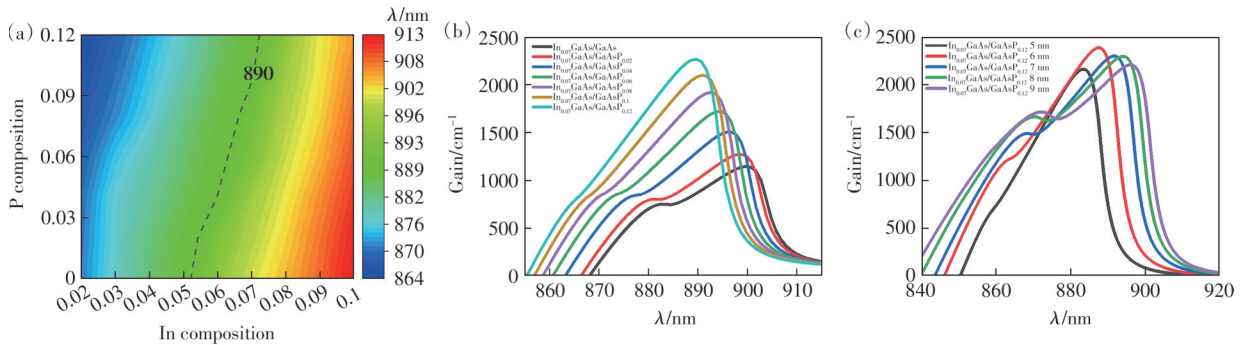


图 3 (a) InGaAs/GaAsP 量子阱材料不同 In 组分和 P 组分对应的峰值增益波长;(b)不同 P 组分对应的峰值增益;(c)不同量子阱厚度对应的峰值增益

Fig.3 Gain characteristics of InGaAs/GaAsP quantum well materials. (a) Peak gain wavelength as a function of In and P compositions. (b) Peak gain as a function of P composition. (c) Peak gain as a function of quantum well thickness

半导体激光器内部损耗 α_i 可用如下公式表示:

$$\alpha_i = \sum_j \Gamma_j (\sigma_n n_j + \sigma_p p_j), \quad (1)$$

Γ_j 为激光器某一层的光学限制因子, σ_n 和 σ_p 为自由电子和自由空穴的吸收系数, n_j 和 p_j 为某一层的掺杂浓度,掺杂浓度越高,损耗越大,降低

器件的输出功率^[14],但串联电阻与掺杂浓度成反比。本文计算了激光器 n 侧波导层和包层的掺杂浓度对器件内部损耗的影响,波导层的光学限制因子为 0.73,包层的光学限制因子为 0.000 2,如图 4 所示。波导层的掺杂浓度变化对器件内部损耗产生极大影响,而包层掺杂浓度变化几乎对内部损耗无影响,这是因为光场更多地分布在波导层中。因此,本方案中掺杂由量子阱向两边逐渐升高,由于光场主要集中在波导层区域,适当降低波导层掺杂浓度,增大包层区域掺杂浓度,可获得具有低光学损耗、高电导率的半导体激光器外延材料。

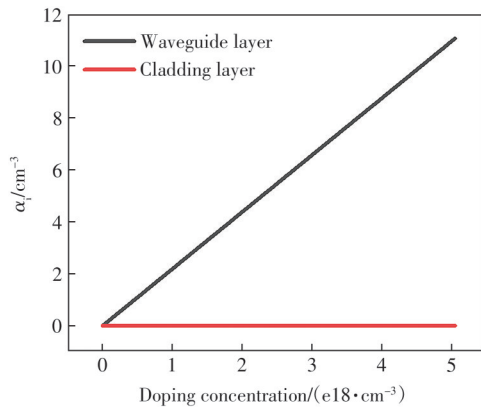


图 4 激光器内部损耗随着波导层及包层掺杂浓度的变化
Fig.4 Internal loss of the laser varies with the doping concentration in the waveguide and cladding layers

2.2 器件制备与测试

首先制备 200 μm 宽的脊波导台面,通过等离子体增强化学气相沉积和电感耦合等离子体刻蚀形成 190 μm 的电注入窗口,然后进行 p 面金属接

触沉积,晶圆衬底进行减薄抛光处理,之后进行 n 面金属接触沉积,最后进行快速热退火完成合金。

晶圆片制作完成后进行真空解理操作,腔面沉积 ZnSe 钝化膜,ZnSe 是一种宽带隙材料,对于 890 nm 的光子能量透明,本征吸收极低。其较高的热导率和良好的机械性能能有效地将腔面处的热量耗散,并阻挡空气中的水分和氧气对腔面 Al-GaAs 材料的侵蚀,从而显著提高灾难性光学镜面损伤阈值,从工艺上提升了器件的功率耐受性与长期稳定性。随后,在该钝化层上分别镀制前腔面增透膜和后腔面高反膜,ZnSe 层在此充当了关键的界面层,既保护了腔面,又为后续介质膜提供了良好的附着基底;再将巴条切成单管芯片。制作的芯片腔长为 5 mm,最后利用贴片机将单管芯片 p 面朝下焊接在热沉上,测试温度由热电冷却器控制。测试采用的光谱仪分辨率为 0.1 nm。器件的远场测试采用倍率为 20 倍的物镜。

3 结果与讨论

图 5 为激光器在 20 $^{\circ}\text{C}$ 连续工作条件下测得的功率-电流-电压特性,图 5(a) 为单管激光器光功率、电压和转换效率随工作电流的变化关系,图 5(b) 为光纤耦合模块的光功率、电压随工作电流的变化关系。可以看出,封装到热沉上的单管芯片(COS)在 20 $^{\circ}\text{C}$ 测试环境下,阈值电流约为 1.49 A,斜率效率在阈值电流附近约为 1.17 W/A,最高电光转换效率为 53%(输出功率为 8.17 W),18 A 电流下的输出功率达到 16.12 W;将 10 个单管激光器芯片贴装到热沉上,并完成金丝键合,采用快轴准

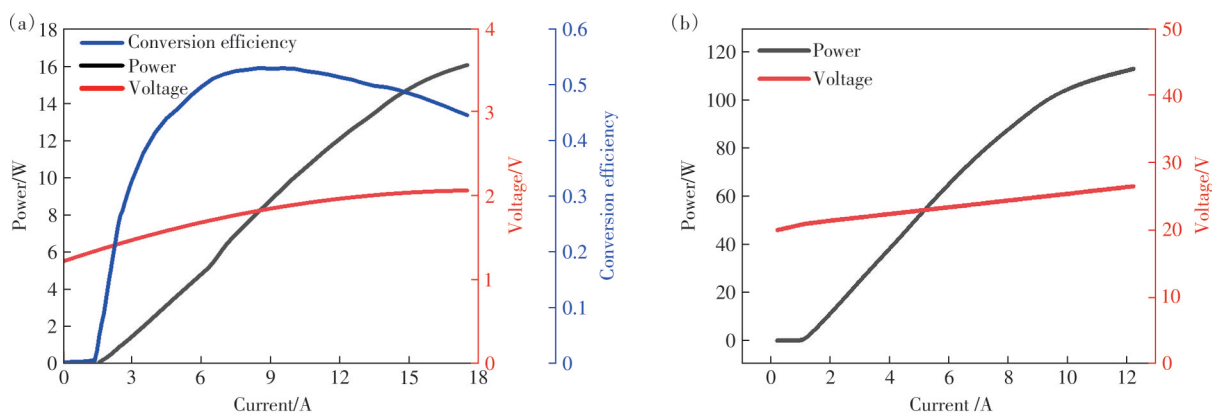


图 5 室温连续工作下,(a)单管激光器的光功率、电压和转换效率随工作电流的变化关系,(b)光纤耦合模块的光功率、电压随工作电流的变化关系

Fig.5 Under room-temperature continuous-wave operation: (a) variations of optical power, voltage, and conversion efficiency with operating current for a single-emitter laser diode, (b) variations of optical power and voltage with operating current for a combined fiber-coupled module

直镜和慢轴准直镜对激光器发出的强发散椭圆光束进行整形校正, 形成对称的准直光斑; 再通过聚焦透镜将光会聚至 105 μm 0.18 NA 光纤端面实现耦合。对准完成后, 使用激光焊接技术将光学组件永久固定, 最后将已固定好的光学元件组件安装到模块外壳内, 制备的模块在偏置电流为 12 A 时, 输出功率为 113 W, 合束效率为 70%。器件的高输出功率主要源于优化量子阱势垒高度, 减少了泄漏的载流子, 非对称大光腔波导结构设计降低了吸收损耗, 增大了光模式尺寸, 降低功率密度, 抑制光与载流子相互作用, 从而抑制了器件的纵向空间烧孔效应。

为了研究温度对器件输出性能的影响, 本文进一步测量了单管激光器在 10~60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内阈值电流、斜率效率随温度的变化, 如图 6(a) 所示。当工作温度升高, 激光器内部由于载流子泄

露导致材料增益下降, 内部损耗增大, 使得阈值电流增大, 但是斜率效率只有略微降低。因此, 设计的高带阶 InGaAs/GaAsP 量子阱材料体系对载流子起到了明显的限制作用, 使得激光器的内部量子效率增大, 使斜率效率实现较高的温度稳定性。阈值电流较高主要原因在于大光腔结构虽然可以提升功率和光学灾变损伤阈值, 但是会降低光学限制因子, 只有部分光场与有源增益区重叠。因此, 需要有源区提供更高的材料增益来补偿光场利用率低的问题, 导致阈值电流增大, 并且阈值电流随温度升高变化明显, 温度升高载流子横向扩散加剧, 大量载流子逃逸出有源区的有效增益区域, 因而需更高电流才能在增益区积累足够载流子, 从而导致阈值电流增大。图 6(b) 为激光器在 20 $^{\circ}\text{C}$ 连续工作条件下测得的激光光谱, 器件的波长在 890 nm 附近。

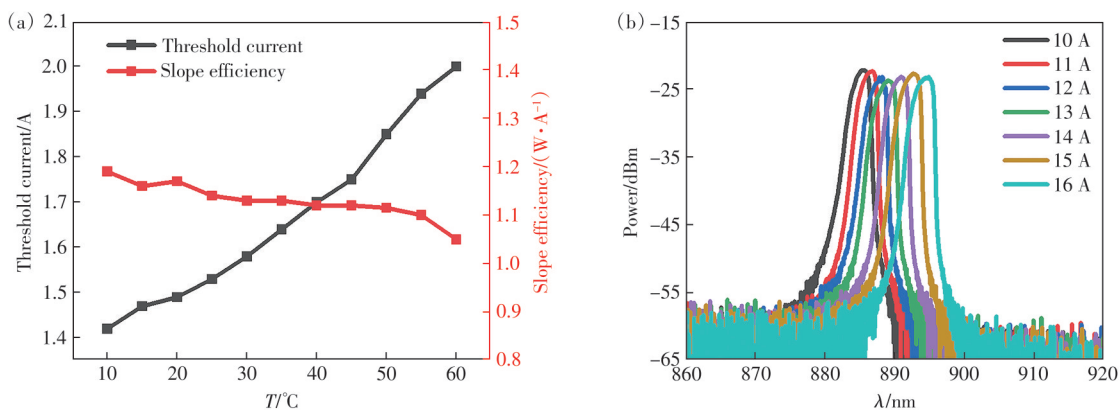


图 6 (a) 阈值电流和斜率效率随温度变化关系; (b) 室温连续电流下激光器的激光光谱

Fig.6 (a) Temperature dependence of threshold current and slope efficiency. (b) Lasing spectra of the laser under room-temperature continuous-wave operation

图 7 所示为 20 $^{\circ}\text{C}$ 连续工作下不同电流单管激光器的远场分布和 95% 功率含量定义的远场发

散角变化。激光器的远场发散角随电流的增加而变大, 偏置电流为 6 A 时, 对应的慢轴发散角为

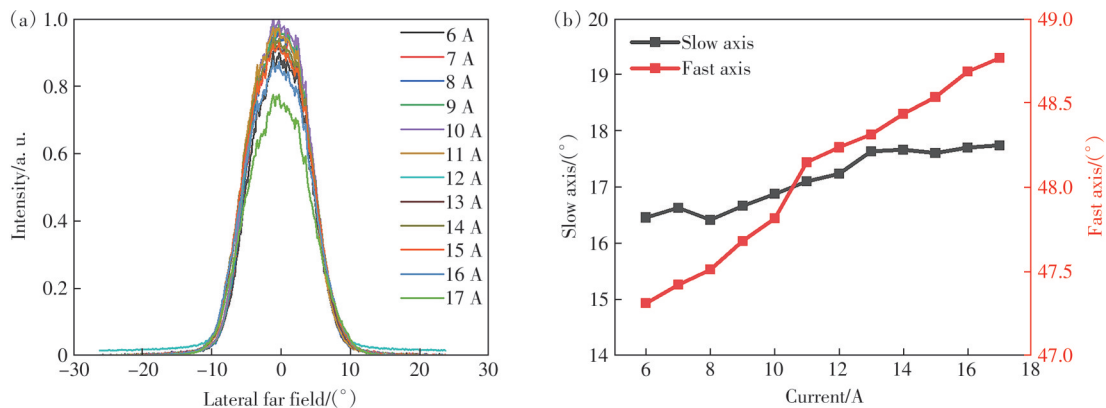


图 7 室温连续工作下不同电流 (a) 激光器的远场分布, (b) 95% 功率含量的快轴慢轴远场发散角

Fig.7 Under room-temperature continuous-wave operation at different currents: (a) far-field distribution of the laser, (b) far-field divergence angles (fast-axis and slow-axis) containing 95% of the optical power

16.4°, 快轴发散角为 47.3°; 当偏置电流增大到 17 A 时, 对应的慢轴发散角为 17.7°, 快轴发散角为 48.4°; 器件远场发散角在 11 A 的宽偏置电流范围内, 慢轴变化 1.3°, 快轴变化 1.1°。宽区半导体激光器因其较宽的横向波导尺寸, 在较高驱动电流下, 载流子发生横向扩散, 光场发生强烈变化, 激发出多种横向模式, 近场光斑出现“多瓣”现象, 因此存在远场发散角变大的现象^[15]。

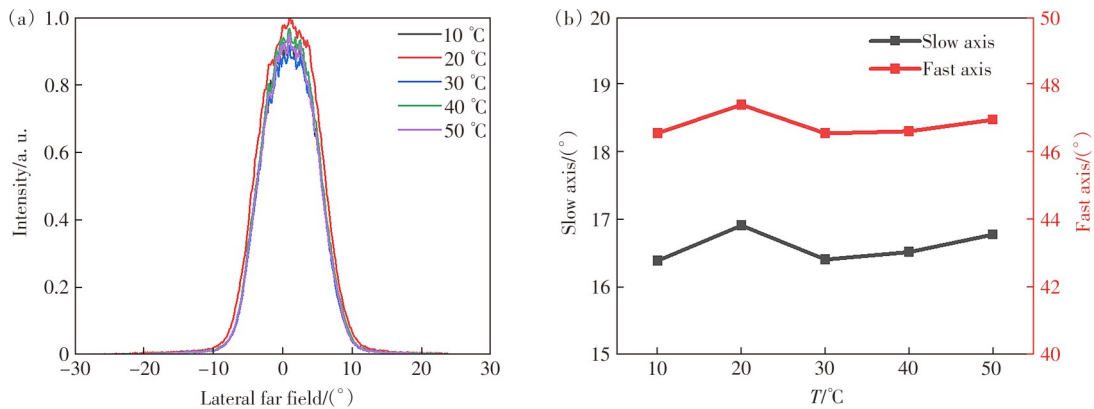


图 8 10 A 连续工作电流、不同温度下, (a) 激光器的远场分布, (b) 95% 功率含量的快轴慢轴远场发散角

Fig.8 At a continuous operating current of 10 A and different temperatures: (a) far-field distribution of the laser, (b) far-field divergence angles (fast-axis and slow-axis) containing 95% of the optical power

4 结 论

本文研发制备了激光波长为 890 nm 的宽区高功率半导体激光器, 采用高带阶 InGaAs/GaAsP 量子阱材料体系来抑制大电流下的载流子泄漏, 采用非对称大光腔的波导结构, 结合真空解理钝化工艺和腔面沉积钝化膜提高灾变光损伤阈值功率, 获得了高功率低损耗的外延结构, 并制备了光纤耦合模块。制备的 200 μm 条

宽单管激光器输出功率达到 16.12 W, 最大转换效率为 53%, 半导体激光器模块耦合至 105 μm 0.18 NA 光纤中, 最大输出功率为 113 W。上述研究结果可很好地满足中红外光纤激光器泵浦源的性能需求。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250266>

参 考 文 献:

- [1] SHA H B, SONG Y, CHEN Y Y, *et al.* Advances in semiconductor lasers based on parity-time symmetry [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(7): 571.
- [2] 范杰, 龚春阳, 杨晶晶, 等. 分布布拉格反射器半导体激光器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 060003.
FAN J, GONG C Y, YANG J J, *et al.* Research progress of distributed Bragg reflector semiconductor lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2019, 56(6): 060003. (in Chinese)
- [3] 谢圣文, 杨成奥, 黄书山, 等. 2 μm GaSb 基大功率半导体激光器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0503003.
XIE S W, YANG C A, HUANG S S, *et al.* Research progress of 2 μm GaSb-based high power semiconductor laser [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2018, 47(5): 0503003. (in Chinese)
- [4] HECHT J. Short history of laser development [J]. *Opt. Eng.*, 2010, 49(9): 091002.
- [5] 王俊, 谭少阳, 刘武灵, 等. GaAs 基高功率边发射半导体激光器研究进展(特邀) [J]. *中国激光*, 2025, 52(16):

1603001.
WANG J, TAN S Y, LIU W L, *et al.* Research progress on GaAs-based high-power edge-emitting semiconductor lasers (invited) [J]. *Chin. J. Lasers*, 2025, 52(16): 1603001. (in Chinese)
- [6] BOTEZ D. Design considerations and analytical approximations for high continuous-wave power, broad-waveguide diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(21): 3102-3104.
- [7] ZIEGLER M, TALALAEV V, TOMM J W, *et al.* Surface recombination and facet heating in high-power diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(20): 203506.
- [8] HEMPEL M, LA MATTINA F, TOMM J W, *et al.* Defect evolution during catastrophic optical damage of diode lasers [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, 26(7): 075020.
- [9] 郑显达, 刘亚楠, 佟存柱, 等. 780 nm 宽区高效率半导体激光器温度特性研究 [J]. *中国激光*, 2025, 52(3): 0301004.
ZHENG X D, LIU Y N, TONG C Z, *et al.* Temperature characteristics of 780 nm broad-area high-efficiency semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2025, 52(3): 0301004. (in Chinese)
- [10] NAGASE M, MOZUME T, SIMOYAMA T, *et al.* Strain compensation for InGaAs-AlAs-AlAsSb coupled double quantum wells by controlling the barrier layer composition [J]. *J. Cryst. Growth*, 2007, 301-302: 240-243.
- [11] ASRYAN L V, ZUBOV F I, KRYZHANOVSKAYA N V, *et al.* Lasers with asymmetric barrier layers: a promising type of injection lasers [J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2016, 741: 012111.
- [12] 王鑫, 朱凌妮, 赵懿昊, 等. 915 nm 半导体激光器新型腔面钝化工艺 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0105002
WANG X, ZHU L N, ZHAO Y H, *et al.* 915 nm semiconductor laser new type facet passivation technology [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2019, 48(1): 0105002. (in Chinese)
- [13] 付鹏, 张艳春, 赵涛, 等. 高效率大功率 976 nm 半导体激光芯片设计与制备 [J]. *中国激光*, 2024, 51(7): 0701017.
FU P, ZHANG Y C, ZHOA T, *et al.* Design and fabrication of high-efficiency and high-power 976 nm semiconductor laser chips [J]. *Chin. J. Lasers*, 2024, 51(7): 0701017. (in Chinese)
- [14] 丁永康. 高效率大功率 940 nm 半导体激光器的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2022.
DING Y K. *Research on High Efficiency and High Power 940 nm Semiconductor Laser* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2022. (in Chinese)
- [15] GROSS S, COUTTS D W, DUBINSKIY M, *et al.* Beam shaping of a broad-area laser diode using 3D integrated optics [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44(4): 831-834.



苑高辉(2000-),男,吉林通化人,博士研究生,2022年于长春理工大学获得学士学位,主要从事边发射半导体激光器方面的研究。

E-mail: yuangaohui22@mails.ucas.ac.cn

cn



周寅利(1988-),男,内蒙古通辽人,博士,副研究员,2017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,主要从事半导体光电子材料及器件的研究。

E-mail: zhouyinli@ciomp.ac.cn