

文章编号: 1000-7032(2026)06-1043-09

## 高功率极低发散角 976 nm 单模半导体激光器

庞 政<sup>1,2</sup>, 汪丽杰<sup>1,3\*</sup>, 刘亚楠<sup>3</sup>, 王延靖<sup>1</sup>, 陆寰宇<sup>1</sup>, 季云菲<sup>3</sup>,  
郑显达<sup>1,2</sup>, 王玉山<sup>3</sup>, 薛晓娥<sup>1</sup>, 田思聪<sup>1</sup>, 孟 博<sup>1</sup>, 佟存柱<sup>1,3</sup>

(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;

3. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130031)

**摘要:** 掺铒光纤放大器(EDFA)是全光网络大容量通信的核心器件,它需要高功率单模半导体激光泵浦产生光信号放大。本文研制了高功率 976 nm 单模半导体激光芯片,采用非对称布拉格反射波导外延结构,实现了极低发散角近圆形光束输出。制备的激光器最高连续输出功率超过 1.5 W(受热饱和限制),在 1.2 A 电流下获得 0.83 W 无扭折功率,此时含 95% 功率垂直发散角和侧向发散角分别为 13.70° 和 10.95°,输出激光峰值波长为 976.16 nm, -3 dB 光谱宽度仅为 0.11 nm,边模抑制比达到 40 dB。激光器远场分布对热沉温度与工作电流变化不敏感,即使在热饱和条件下工作,含 95% 功率垂直发散角仍在 16° 以下。这种激光芯片可实现高效率单模光纤耦合,有利于发展低成本高功率单模 EDFA 激光泵浦模块。

**关键词:** 布拉格反射波导; 单模半导体激光器; 高功率; 低远场发散角; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260053

CSTR: 32170.14.CJL.20260053

## High-power, Single-mode 976 nm Diode Laser with Ultra-low Divergence Angle

PANG Zheng<sup>1,2</sup>, WANG Lijie<sup>1,3\*</sup>, LIU Yanan<sup>3</sup>, WANG Yanjing<sup>1</sup>, LU Huanyu<sup>1</sup>, JI Yunfei<sup>3</sup>,  
ZHENG Xianda<sup>1,2</sup>, WANG Yushan<sup>3</sup>, XUE Xiaoe<sup>1</sup>, TIAN Sicong<sup>1</sup>, MENG Bo<sup>1</sup>, TONG Cunzhu<sup>1,3</sup>

(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;

3. JLight Semiconductor Technology Co., Ltd., Changchun 130031, China)

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

**Abstract:** Erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) serve as key component of high-capacity, all-optical communication networks, relying critically on high-power, single-mode diode laser pumping sources to achieve efficient optical signal amplification. This paper reports a high-power 976 nm single-mode diode laser chip. The device utilizes an asymmetric Bragg reflector waveguide epitaxial structure, achieving an ultra-low far-field divergence angle and a nearly circular beam profile. Experimental results demonstrate a maximum continuous-wave (CW) output power exceeding 1.5 W for the laser, limited by thermal saturation. The kink-free output power reaches 0.83 W at an injection current of 1.2 A. At this operating current, the vertical and lateral divergence angles containing 95% power are measured at 13.70° and 10.95° respectively. The laser emits at a peak wavelength of 976.16 nm with a narrow spectral width of 0.11 nm (at -3 dB) and a side-mode suppression ratio (SMSR) of 40 dB. The far-field distribution

收稿日期: 2026-02-13; 修订日期: 2026-02-28

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20240602024RC, 20250201007GX); 国家自然科学基金(62134008, 62434009); 长春市科技发展计划项目(24SH08)

Supported by Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province(20240602024RC, 20250201007GX); National Natural Science Foundation of China(62134008, 62434009); Science and Technology Development Plan Project of Changchun City(24SH08)

remains stable by varying heat-sink temperature and current. Even under thermal saturation, the vertical divergence angle (defined at 95% power containment) stays below  $16^\circ$ . Owing to its high output power, circular symmetry, and narrow spectral characteristics, this laser chip is conducive to the development of low-cost, high-power single-mode pump modules for EDFAs.

**Keywords:** Bragg reflection waveguide; single-mode diode laser; high-power; low far-field divergence angle; fiber coupling

## 1 引 言

高功率、高亮度半导体激光器因其体积小、效率高及波长覆盖广等优势,在激光泵浦、激光雷达、材料加工、通信及医疗等领域具有广泛且重要的应用需求。掺铒光纤放大器(EDFA)是全光网络大容量通信的核心器件,它主要采用 980 nm 波段高功率单模半导体激光泵浦<sup>[1]</sup>。为应对网络带宽需求持续增长的压力,单纤容量的增加以及密集波分复用技术的应用要求 EDFA 同时放大更多信道的光信号,这对单模激光泵浦源的功率提出了更高的要求,进而需要高功率单模半导体激光芯片及高的单模光纤耦合效率<sup>[2]</sup>。

近些年来,高功率半导体激光器芯片技术取得了重要进展,目前宽区 976 nm 半导体激光器单管芯片连续功率已可超 45 W<sup>[3-5]</sup>,双结激光芯片连续功率超过 100 W<sup>[6]</sup>。宽区半导体激光器虽然可以通过增大增益面积来提高输出功率,但会增大侧向激射模式数量,使激光器远场发散角增大及光束质量退化,具有很低的单模光纤耦合效率。面向 EDFA 泵浦应用,泵浦源的理想特性是稳定的单模特性、近衍射极限的光束质量以及高的稳定性<sup>[7]</sup>。为提高半导体激光的光束质量,可优化其光波导设计,降低激射模式数。锥形激光器或种子振荡功率放大器(MOPA)单片集成窄脊波导及功率放大部分<sup>[8-9]</sup>,可实现 >10 W 功率下近衍射极限光束质量( $1/e^2$ 定义),但其远场存在旁瓣,而且面临散光问题<sup>[10]</sup>,需要进行复杂的光束整形才能获得高的单模光纤耦合效率<sup>[11]</sup>。采用窄的脊型波导有利于获得稳定的单模工作,但高的腔面功率密度面临灾变光损伤问题,输出功率受到限制<sup>[12]</sup>。2024年,中国科学院半导体研究所报道了一种基于非对称大光腔外延结构的 976 nm 激光器,实现了 422 mW 最大连续输出功率,垂直发散角半高全宽(FWHM)为  $24.15^\circ$ <sup>[13]</sup>。为进一步实现高输出功率和高光束质量兼得,通过采用侧向耦

合波导结构,利用宇称时间(PT)对称性或超对称性来抑制高阶侧模<sup>[14-17]</sup>,实现了较宽波导单模工作,采用这种方法目前单模输出功率可提高到 0.6 W。综上所述,如何在维持高功率输出的同时,实现稳定、可靠的单模工作,已成为该领域重点研究方向之一。

传统边发射半导体激光器外延结构采用窄的全反射波导结构,导致大的垂直(快轴)方向发散角,输出椭圆光束,这种发射光斑的不对称性及大的发散角会限制其单模光纤耦合效率。与单模光纤纤芯直径及数值孔径匹配的激光光束有利于得到高耦合效率,因此发展低发散角单模半导体激光芯片具有重要研究意义<sup>[18-19]</sup>。增大垂直方向光模式尺寸不仅可以降低垂直发散角,还可以提高灾变损伤阈值,有利于提高输出功率。针对这一需求,国内外研究团队发展了多种大光腔外延结构来降低垂直发散角。2008年,德国 FBH 采用 4.8  $\mu\text{m}$  厚超大光腔外延结构,制备的 5  $\mu\text{m}$  脊宽 1 064 nm 激光器在 1.5 W 功率下光束质量接近衍射极限,垂直发散角为  $15.8^\circ$  (FWHM)<sup>[20]</sup>;该单位通过将波导层厚度增大到 8.6  $\mu\text{m}$ ,实现了 1.3 W 连续功率,半高全宽及含 95% 功率垂直发散角分别为  $9^\circ$  和  $17^\circ$ <sup>[21]</sup>。但这种方法受传统激光器垂直方向全反射波导结构的限制,当波导尺寸增大时,会面临高阶模式激射的问题,这将使激光器光束质量劣化,并阻止发散角进一步减小。另外,这些方法通过降低波导层和包层的折射率差来扩展光模式,器件对工作温度或电流改变引起的折射率变化非常敏感,稳定性不高。因此,一些新型波导结构被提出来实现大的光模式尺寸。2010年,美国林肯实验室报道了平板耦合光波导激光器(SCOWL),通过垂直方向厚的无源波导实现单模工作,连续输出功率可达 2 W<sup>[22]</sup>。2014年,德国柏林工业大学制备了 9  $\mu\text{m}$  脊宽的 1 060 nm 纵向光子带晶体(PBC)激光器,它仅在 N 面波导利用光子带隙原理进行光学导波,单模连续输出功率

可达1.9 W,相应的光束质量因子为1.9,垂直发散角为 $14^\circ$  (FWHM)<sup>[23]</sup>;2017年,中国科学院半导体研究所采用相似外延结构,制备的 $7\ \mu\text{m}$ 脊宽的980 nm激光器最高连续功率可达2.4 W,垂直发散角为 $14.4^\circ$  (FWHM),但由于量子阱局域光波导引起的旁峰,含95%功率垂直发散角为 $38.1^\circ$ <sup>[24]</sup>。通过修正PBC激光器的周期性波导,德国柏林工业大学制备的高亮度垂直宽区边发射(HiBBEE)激光器在1060 nm波长实现了2.2 W的单横模功率,垂直发散角为 $9^\circ$  (FWHM)<sup>[25]</sup>;结合侧向非均匀波导结构,可实现更高亮度激光输出<sup>[26-28]</sup>。上述结果虽然获得了较低的半高全宽垂直发散角,但由于其P面波导强的光场限制导致激光器远场具有大的拖尾和旁瓣,激光器含95%功率的垂直发散角很大(通常 $>20^\circ$ ),限制了光纤耦合效率。为解决该问题,中国科学院长春光机所采用双边布拉格反射波导,并降低光缺陷层折射率抑制局域光波导效应,实现了极大光模式扩展且稳定单模工作,从而获得极低的垂直发散角,制备的808 nm波长边发射半导体激光器可输出稳定的圆形光束,垂直发散角半高全宽降至 $5^\circ$ 以下,特别是含

95%功率垂直发散角也压缩至 $10^\circ$ 以下,可获得高的光纤耦合效率<sup>[29-30]</sup>。

本文在之前双边布拉格反射波导激光器研究基础上,采用非对称双边布拉格反射波导结构,通过优化光缺陷层材料及厚度实现光限制因子和光模式扩展间折衷优化,制备出一种低远场发散角、近圆形光束的976 nm单模半导体激光器,并对器件的输出功率、光谱特性和远场发散角等性能参数进行了测试分析,研究了不同工作温度对激光器功率、远场、光谱等特性的影响。

## 2 结构设计和制备

布拉格反射波导激光器(BRL)由上、下布拉格反射镜(DBR)和中心光缺陷层组成,如图1所示,有源区位于光缺陷层内,它利用光子带隙效应替代传统的全反射波导进行光限制。DBR由折射率分别为 $n_H$ 、 $n_L$ 的高、低折射率材料交替组成,选择不同组分的AlGaAs材料。为了增强模式分辨,通过设计波导仅使基模位于光子带隙内,使高阶模相对于基模具有低的光增益、高的损耗,从而实现大光模式尺寸稳定的单模工作。

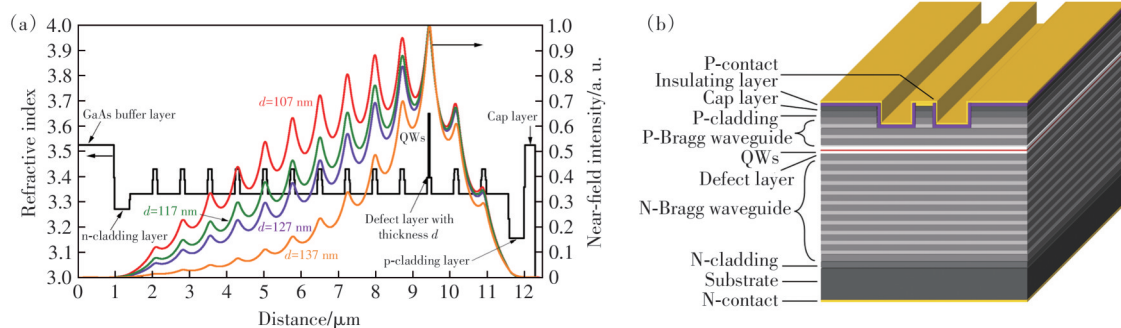


图1 976 nm BRL光场分布及结构示意图。(a)不同光缺陷层厚度下激光器的基模近场光场分布;(b)脊形BRL结构示意图

Fig.1 Optical field distribution and schematic structure of the 976-nm Bragg-reflection-waveguide laser (BRL). (a) Near-field distributions of the fundamental mode in lasers with varying optical defect layer thickness. (b) Schematic diagram of the ridge BRL structure

布拉格反射波导激光器设计的一个关键是在光限制因子和光模式尺寸之间折衷优化。布拉格反射波导的材料和厚度、光缺陷强度直接影响到光模式扩展,强的光场限制可获得高的光限制因子,有利于降低激光器阈值,但也会导致较窄的光模式扩展,限制垂直发散角的降低。为实现期望的光束发散角与光限制因子,需对布拉格反射波导激光器的外延结构进行折衷优化。本文器件采用非对称双边布拉格反射波导,P型波导层与N型波导层分

别采用2对和10对DBR,高、低折射率层厚度分别为100 nm和500 nm。有源区采用双量子阱结构,通过将光模式局域于有源区内并向N型波导层扩展,实现串联电阻与内部损耗的降低。光缺陷层厚度和折射率是实现低垂直发散角的关键。光缺陷层(AlGaAs材料)采用低Al组分(高折射率)或大厚度时,导模有效折射率会增大,光模式限制增强,产生较小的光模式尺寸及较大的垂直发散角。在实际的激光器设计中,量子阱材料通常具有非常高

的折射率,导致局域光波导效应,引起垂直发散角大的拖尾。因此,本文采用中间折射率光缺陷层来实现大的光模式扩展,光缺陷层折射率介于  $n_H$ 、 $n_L$  之间,其厚度为  $d$ ,通过调节  $d$  可调控光场分布。图 1(a)所示为仿真的激光器外延结构折射率分布和不同光缺陷层厚度下基模的近场分布。由图中可见,当  $d$  降低时,光模式扩展增强,可获得更低的垂直发散角,但有源区的光限制因子也会降低。当  $d$  为 107, 117, 127, 137 nm 时,光限制因子分别为 0.38%、0.57%、0.79% 和 0.99%,相应模拟计算的远场发散角( $1/e^2$ )分别为  $10.2^\circ$ 、 $10.8^\circ$ 、 $12.6^\circ$  和  $14.4^\circ$ 。在本文中,光缺陷层厚度取 127 nm,在确保足够光限制因子和模式稳定性的前提下降低发散角。为降低光吸收损耗,采用分段式渐变掺杂技术,掺杂浓度由有源区向两边逐渐提高,光强高的区域进行低掺杂,并调整量子阱、泄露层在波导中的位置控制模式增益及损耗。此外,异质界面间采用组分渐变层来降低势垒电压。

外延结构采用德国 AIXTRON 公司 G4 型金属有机化学气相沉积(MOCVD)在 n 型掺杂的  $(100)\pm 2^\circ$  晶向的 GaAs 衬底上生长。通过精细优化生长温度、反应室压力、源流量及圆盘转速等生长条件,得到了高均匀性、低缺陷密度的外延片。外延片清洗后,首先通过光刻和湿法腐蚀工艺制备对版标层,随后采用光刻和电感耦合等离子(ICP)干法刻蚀工艺制备窄脊台面,脊宽为  $6\ \mu\text{m}$ 。通过优化反应室压力、气体流量、上下电极功率和温度等参数调控刻蚀形貌,获得了光滑陡直的侧壁,刻蚀深度约为  $2.3\ \mu\text{m}$ 。然后,通过等离子增强化学气相沉积(PECVD)生长  $200\ \text{nm}$  厚  $\text{SiO}_2$  作为绝缘膜,并通过光刻和反应离子束(RIE)刻蚀开电极窗口,窗口宽度为  $4\ \mu\text{m}$ 。P 面金属(Ti-Pt-Au)电极沉积及合金后,晶圆衬底经过减薄和抛光,进行 N 面金属(Ni-GeAu-Au)电极沉积及快速热退火。晶圆制备工艺完成后,解理成巴条进行腔面处理及镀膜,然后将巴条解理成单管芯片,芯片腔长为  $3\ \text{mm}$ 。最后,采用 AuSn 焊料将单管芯片 P 面朝下焊接于 AlN 热沉上,最终进行连续电流测试。

### 3 测试结果及讨论

#### 3.1 光电特性

激光器封装完成后,首先对其进行了综合性能测试。图 2 为制备的脊型激光器在  $20^\circ\text{C}$  温度、连续工作条件下测得的功率-电流-电压(L-I-V)特

性曲线。由图 2 可见,激光器阈值电流约  $0.2\ \text{A}$ ,最高连续输出功率可超过  $1.4\ \text{W}$ ,受热扰动限制。器件的开启电压约为  $1.35\ \text{V}$ ,串联电阻为  $0.619\ \Omega$ 。与典型商用单模  $976\ \text{nm}$  半导体激光器(串联电阻通常为  $0.15\sim 0.4\ \Omega$  范围内)相比,该器件串联电阻偏高,这主要归因于其采用较厚的波导结构及 DBR 引入的势垒电阻。

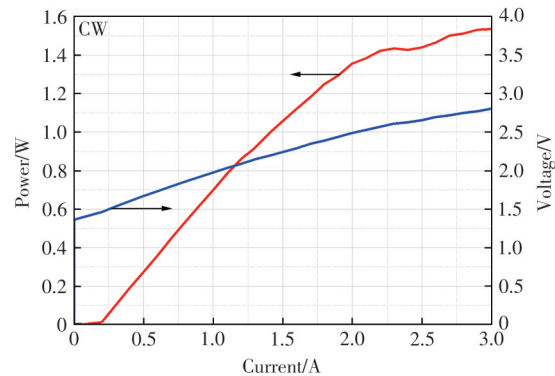


图 2 布拉格反射波导激光器连续工作下测得的光功率-电流-电压(L-I-V)特性

Fig.2 Measured light-current-voltage (L-I-V) characteristics of the Bragg reflection waveguide laser (BRL) under continuous operation

当注入电流达到  $1.2\ \text{A}$  时,激光器输出光功率-电流特性曲线偏离理想的线性区,出现一个非线性拐点或轻微扭曲,即发生扭折现象,激光器斜率效率轻微降低。这种扭折现象主要与模式竞争或热效应引发的载流子分布突变有关。本文制备激光器为深刻蚀脊形激光器,当工作电流增大到一定值,由于结温升高及侧向载流子扩散,折射率和载流子分布发生变化,出现空间烧孔或模场变化,导致斜率效率下降<sup>[31]</sup>。当工作电流增大到  $2.3\ \text{A}$  时,出现了更明显的扭折现象,主要源于热效应引起的增益饱和,进而加剧了模式间竞争。通常将出现扭折前的最大输出功率定义为“无扭折输出功率”,在  $1.2\ \text{A}$  电流下,激光器无扭折输出功率为  $0.83\ \text{W}$ ,斜率效率为  $0.84\ \text{W/A}$ ,此时电光转换效率为  $33.5\%$ 。

图 3 为制备的脊型 BRL 在  $25^\circ\text{C}$ 、 $1.2\ \text{A}$  电流下测得的激射光谱,由图中可见,器件峰值波长为  $976.16\ \text{nm}$ ,边模抑制比 SMSR 达到  $40\ \text{dB}$ ,相应的  $-3\ \text{dB}$  光谱宽度仅为  $0.11\ \text{nm}$ ,表明激光器有非常优秀的单模性能,能稳定单模工作。窄光谱宽度有助于将激光能量更精准地匹配光纤放大器中掺铟离子尖锐的吸收峰,从而显著提升泵浦效率。

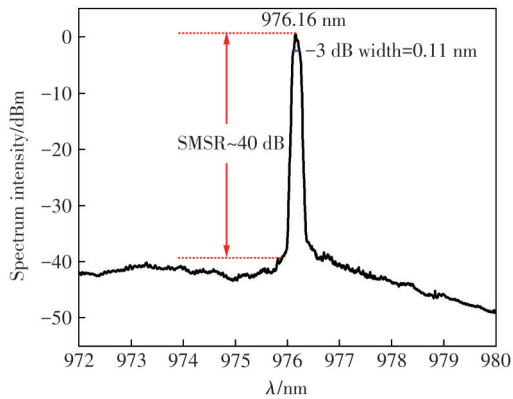


图 3 布拉格反射波导激光器在 1.2 A 连续电流下的激光光谱

Fig.3 Lasing spectrum of the BRL at 1.2 A

为研究激光器远场(FF)发散角随电流的变化关系,图 4(a)~(c)分别展示了在 2.3 A、1.8 A 和 1.2 A 连续电流下测得的激光器垂直及侧向远场分布。测试结果表明,随着电流的增大,器件的垂直及侧向远场光分布能维持高斯分布形状,证实了制备的 BRL 具备良好的单模工作特性。在 1.2 A 电流下,激光器垂直和侧向半高全宽发散角分别为 8.69° 和 6.86°, 含 95% 功率的垂直及侧向发散角分别为 13.70° 和 10.95°。图 4(c)中插

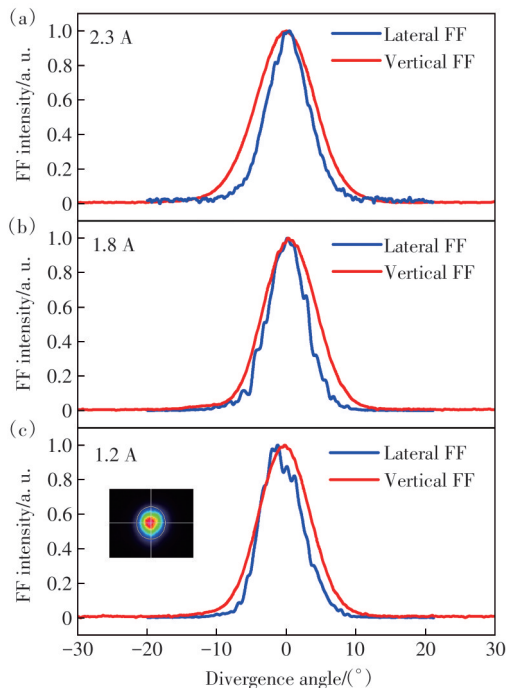


图 4 测得的布拉格反射波导激光器在 (a)2.3 A、(b)1.8 A 和 (c)1.2 A 连续电流工作下垂直方向和侧向的远场分布

Fig.4 Measured far-field (FF) profiles of the BRL in the vertical and lateral directions at various currents of (a)2.3 A, (b)1.8 A, and (c)1.2 A

图为 1.2 A 电流下测得的激光器远场光斑形貌,可见激光器输出近圆形的光束。当电流提高到 1.8 A 时,垂直方向和侧向远场发散角基本不变。当电流增大到 2.3 A 时,垂直和侧向远场发散角有小幅增加,含 95% 功率垂直和侧向发散角增大至 15.91° 和 11.25°。

图 5 为制备的脊形 BRL 在不同电流下测得的远场发散角。由图中可见,随着工作电流的增加,半高全宽侧向发散角( $\theta_{//, FWHM}$ )和含 95% 功率侧向发散角( $\theta_{//, 95\%}$ )几乎无变化;半高全宽垂直发散角( $\theta_{\perp, FWHM}$ )随电流增大也保持稳定,仅含 95% 功率垂直发散角( $\theta_{\perp, 95\%}$ )在发生热饱和后有一定的展宽,但变化范围在 2° 以内。这种远场展宽主要是由于热透镜效应。激光器在高注入电流下,自热增加会提高垂直和侧向温度渐变。垂直方向有源区及侧向增益条中心具有更高的温度及折射率,引起大的折射率差及波导效应,使得垂直和侧向模式近场尺寸收缩,进而引起远场展宽<sup>[32]</sup>。实验结果表明,所制备的脊形 BRL 可以稳定地单模工作,其垂直发散角显著低于当前商用边发射半导体激光器,与常用的单模光纤数值孔径可以匹配,有利于提升光纤耦合效率。

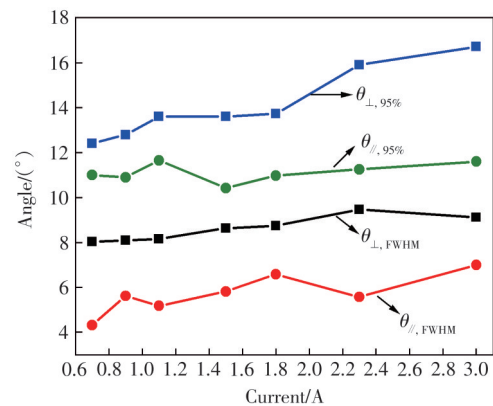


图 5 脊型 BRL 远场发散角随电流的变化情况

Fig.5 Variation of the far-field divergence angle of the ridge BRL under different injection current

### 3.2 温度特性

半导体激光器的性能会随温度升高而下降,为了研究制备激光器的热稳定性,在 15~45 °C 下测量激光器连续工作条件下的  $L-I-V$  曲线。当温度从 15 °C 升至 45 °C 时,激光器的阈值电流显著增加,而斜率效率略有下降。在 15 °C 时,阈值电流为 180 mA;当温度升至 45 °C 时,阈值电流增加至 240 mA,相应的 1.2 A 电流下输出功率从 0.83 W 降至 0.68 W。

半导体激光器阈值电流的温度敏感性通常由特征温度常数  $T_0$  来表示, 给定温度 ( $T$ ) 下的阈值电流密度 ( $J_{th}$ ) 可通过以下公式计算:  $J_{th}(T) = J_0 \exp(T/T_0)$ , 其中  $J_0$  为常数。如图 6 所示, 通过计算阈值电流密度自然对数  $\ln J_{th}$  随温度升高的变化情况, 进行线性拟合得到激光器的特征温度  $T_0 = 116$  K。进一步增大激光器的势垒高度有助于提高特征温度。

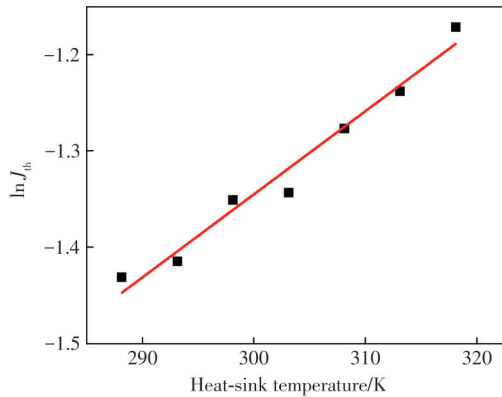


图 6 激光器阈值电流密度对数随热沉温度的变化

Fig.6 Graph showing the variations of natural logarithm of the threshold current density ( $J_{th}$ ) with increasing heat-sink temperature for lasers

图 7 为激光器在 1.2 A 电流下远场发散角随工作温度的变化情况。当温度从 15 °C 升高到 40 °C 时, 垂直远场发散角变化较小, 总体保持稳定; 半高全宽侧向发散角在 30 °C 时出现较小幅度增加, 随后随温度继续升高保持稳定, 含 95% 功率侧向发散角保持稳定。可见, 当工作温度变化时, 激光器的远场光斑形貌基本保持不变, 有利于维持高的单模光纤耦合效率。

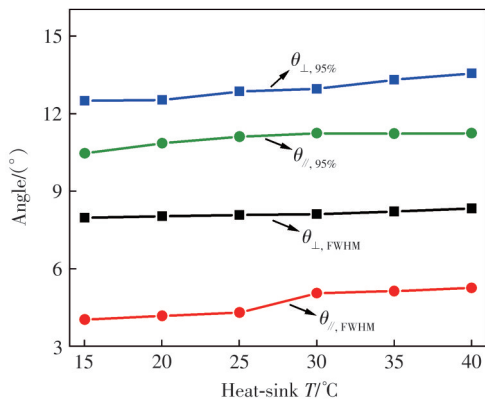


图 7 脊型 BRL 远场发散角随热沉温度的变化情况

Fig.7 Variation of the far-field divergence angle of the ridge BRL under different heat-sink temperatures

图 8 为恒定电流下, 不同温度时测得的激光光谱。在 15 °C 下, 器件峰值波长为 973.04 nm, 此

时 -3 dB 光谱宽度为 0.067 nm, 表现出良好的窄线宽特性。随着测试温度升高, 激射波长发生红移, -3 dB 光谱宽度呈现小幅波动, 但仍远低于普通边发射半导体激光器。在 15~40 °C 工作温度范围内, 器件的边模抑制比始终维持在 35 dB 以上的高水平, 表明器件在测试温度范围内始终保持高质量单模输出。

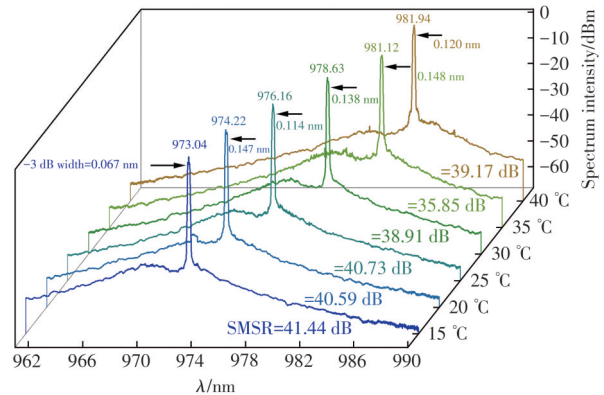


图 8 脊型 BRL 激光光谱随工作温度的变化情况

Fig.8 Variation of the lasing spectra of the ridge BRL under different heat-sink temperatures

### 3.3 可靠性

为评估器件的长期可靠性, 对封装的激光芯片在 1.8 A 连续电流条件下进行了加速老化实验。图 9 展示了多个样品在初始 1 100 h 连续工作期间归一化功率 ( $P/P_0$ ) 随时间的变化情况。在初始阶段所有样品的输出功率均出现小幅波动, 主要由于激光器需要一段时间达到热平衡; 另外, 老化测试系统采用巡检模式, 位置重现性较差会导致功率波动。不考虑小幅功率波动, 可以看到, 经过 1 100 h 连续工作, 激光器没有出现明显的功率衰减及突然失效现象, 证明了其较好的可靠性。

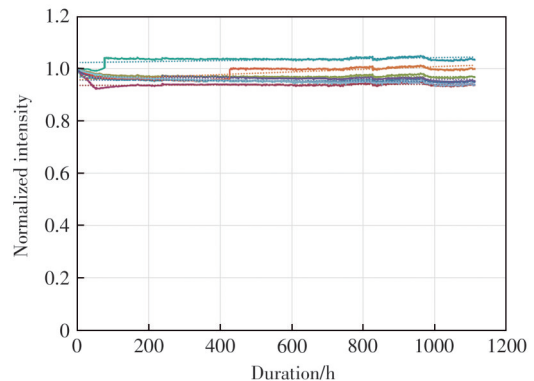


图 9 25 °C 热沉温度、1.8 A 下的激光器寿命测试结果

Fig.9 Laser lifetime test results at 25 °C heat-sink temperature and 1.8 A current

## 4 结 论

本文设计并制备了976 nm单模半导体激光器,为提高窄脊形激光器的输出功率及降低远场发散角,外延结构采用非对称布拉格反射波导结构,获得大模式扩展下稳定单模工作,并增加灾变损伤阈值功率,实现了高功率、低发散角激光输出。制备的6  $\mu\text{m}$ 脊宽激光器连续输出功率可达1.5 W,主要受热饱和和限制。在1.2 A电流下获得0.83 W无扭折光功率,此时垂直发散角仅为8.69°(FWHM)和13.70°(含95%功率),激光器输出近圆形光束(发散角比值 $\approx 1.25$ ),-3 dB光谱宽度低至0.11 nm、边模抑制比超过40 dB。通过改变工作电流和热沉温度,激光器远场分布几乎不

变,激光光谱保持窄线宽及高边模抑制比,展现了稳定的单模工作特性。激光器在1.8 A连续电流下老化1 100 h功率无明显衰减,验证了较好的可靠性。这种极低发散角、近圆形光束的单模半导体激光芯片与单模光纤模场匹配,可简化光纤耦合系统,获得高的直接耦合效率,有助于发展高功率、紧凑、低成本的EDFA泵浦模块。进一步优化激光器的外延结构及封装工艺,降低激光器的电阻和热阻,有望在实现低发散角激光输出的同时获得更高功率、更高效率的激光输出。

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.20260053>

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] LU Y B, CHU P L, ALPHONES A, *et al.* A 105-nm ultrawide-band gain-flattened amplifier combining C- and L-band dual-core EDFAs in a parallel configuration [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, 16(7): 1640-1642.
- [ 2 ] 张渠,童一鸣,陈方林,等. C+L全波段EDFA的实现途径(特邀)[J]. 光学学报(网络版), 2026, 3(1): 0102002. ZHANG Q, TONG Y M, CHEN F L, *et al.* Implementation approaches of C+L full-band erbium-doped fiber amplifier (invited) [J]. *Acta Opt. Sinica (Online)*, 2026, 3(1): 0102002. (in Chinese)
- [ 3 ] 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)
- [ 4 ] TODT R, KHADAR R A, RIEDI S, *et al.* Ultra high-power and highly efficient 9xx nm single emitters with up to 65 W output power under CW operation [C]. *Proceedings of SPIE 12867, High-Power Diode Laser Technology X XII*, San Francisco, 2024: 128670X.
- [ 5 ] YANG G W, LIU Y X, ZHAO Y L, *et al.* Efficient power scaling of broad-area laser diodes from 915 to 1 064 nm [C]. *Proceedings of SPIE 12867, High-Power Diode Laser Technology X XII*, San Francisco, 2024: 128670W.
- [ 6 ] WANG J, TAN S Y, SHAO Y, *et al.* Double-junction cascaded GaAs-based broad-area diode lasers with 132 W continuous wave output power [J]. *Photonics*, 2024, 11(3): 258.
- [ 7 ] ZHANG Z Y, GUO H Y, HE J Y, *et al.* Ultra-low-loss all-fiber 976/1 550 nm few-mode pumping/signal multiplexer for four-mode erbium-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2025, 186: 112630.
- [ 8 ] 谭满清,游道明,郭文涛,等. 单片集成式主振荡功率放大器研究进展[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(1): 61-75. TAN M Q, YOU D M, GUO W T, *et al.* Research progress of monolithic integration master-oscillation power-amplifiers [J]. *Chin. Opt.*, 2023, 16(1): 61-75. (in Chinese)
- [ 9 ] ZINK C, MAAßDORF A, FRICKE J, *et al.* Monolithic master oscillator tilted tapered power amplifier emitting 9.5 W at 1 060 nm [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2020, 32(1): 59-62.
- [ 10 ] HILDENSTEIN P, WERNER N, PASCHKE K, *et al.* Investigation of astigmatism in tapered edge-emitting diode amplifiers at 980 nm [C]. *Proceedings of SPIE 12021, Novel In-Plane Semiconductor Lasers X XI*, San Francisco, 2022: 120210G.
- [ 11 ] JEDRZEJCZYK D, ASBAHR P, PULKA M, *et al.* Injection current-dependent single-mode fiber coupling of a DBR tapered diode laser beam [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016, 28(8): 876-879.

- [12] 李辉, 曲轶, 高欣, 等. 高性能 980 nm 单模半导体激光器 [J]. 兵工学报, 2010, 31(8): 1110-1113.  
LI H, QU Y, GAO X, *et al.* High performance 980 nm single mode semiconductor lasers [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(8): 1110-1113. (in Chinese)
- [13] 王振诺, 仲莉, 张德帅, 等. 低远场发散角 976 nm 基横模脊形半导体激光器 [J]. 光学学报, 2024, 44(8): 0814002.  
WANG Z N, ZHONG L, ZHANG D S, *et al.* 976 nm fundamental transverse mode ridge diode laser with narrow far-field divergence angle [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2024, 44(8): 0814002. (in Chinese)
- [14] ZHAO X L, ZENG S W, SWEATT L, *et al.* High-power single-mode triple-ridge waveguide semiconductor laser based on supersymmetry [J]. *AIP Adv.*, 2021, 11(9): 095216.
- [15] ŞEKER E, OLYAEFFAR B, DADASHI K, *et al.* Single-mode quasi PT-symmetric laser with high power emission [J]. *Light Sci. Appl.*, 2023, 12(1): 149.
- [16] WANG L C, WANG Y F, DONG F X, *et al.* Loss-tailoring single-mode high-power supersymmetric lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(11): 3078-3081.
- [17] OLYAEFFAR B, ŞEKER E, EL-GANAINY R, *et al.* Quasi PT-symmetric edge-emitting lasers outperform PT-symmetric ones [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2025, 31(2): 1502908.
- [18] 欧阳德钦, 阮双琛, 郭春雨, 等. 半导体激光器与单模光纤的全光纤耦合技术研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1205004.  
OUYANG D Q, RUAN S C, GUO C Y, *et al.* Research on all-fiber coupling between a diode laser and single-mode fibers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2011, 38(12): 1205004. (in Chinese)
- [19] ZHOU H B, XU H W, DUAN J A. Review of the technology of a single mode fiber coupling to a laser diode [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2020, 55: 102097.
- [20] WENZEL H, BUGGE F, DALLMER M, *et al.* Fundamental-lateral mode stabilized high-power ridge-waveguide lasers with a low beam divergence [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, 20(3): 214-216.
- [21] PIETRZAK A, WENZEL H, CRUMP P, *et al.* 1 060-nm ridge waveguide lasers based on extremely wide waveguides for 1.3-W continuous-wave emission into a single mode with FWHM divergence angle of  $9^\circ \times 6^\circ$  [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, 48(5): 568-575.
- [22] SMITH G M, HUANG R K, DONNELLY J P, *et al.* High-power slab-coupled optical waveguide lasers [C]. 2010 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Denver, 2010: 479-480.
- [23] MIAH M J, KETTLER T, POSILOVIC K, *et al.* 1.9 W continuous-wave single transverse mode emission from 1 060 nm edge-emitting lasers with vertically extended lasing area [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(15): 151105.
- [24] ZHAO S Y, WANG Y F, QU H W, *et al.* 2-W high-efficiency ridge-waveguide lasers with single transverse mode and low vertical divergence [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(23): 2005-2007.
- [25] MIAH M J, KALOSHA V P, BIMBERG D, *et al.* Astigmatism-free high-brightness 1 060 nm edge-emitting lasers with narrow circular beam profile [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(26): 30514-30522.
- [26] MIAH M J, STROHMAIER S, URBAN G, *et al.* Beam quality improvement of high-power semiconductor lasers using laterally inhomogeneous waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(22): 221107.
- [27] WU C K, XUE X E, TIAN S C, *et al.* Brightness improvement of edge-emitting lasers by combining vertical broad-area HiBEE and laterally inhomogeneous waveguides [J]. *APL Photonics*, 2024, 9(12): 126113.
- [28] 刘祥, 吴承坤, 薛晓娥, 等. 高亮度 1 060 nm HiBEE 锥形半导体激光器 [J]. 发光学报, 2025, 46(7): 1310-1316.  
LIU X, WU C K, XUE X E, *et al.* 1 060 nm high-brightness HiBEE tapered semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(7): 1310-1316. (in Chinese)
- [29] WANG L J, TONG C Z, TIAN S C, *et al.* High-power ultralow divergence edge-emitting diode laser with circular beam [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2015, 21(6): 1501609.
- [30] 佟存柱, 汪丽杰, 田思聪, 等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究 [J]. 中国光学, 2015, 8(3): 480-498.  
TONG C Z, WANG L J, TIAN S C, *et al.* Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chin. Opt.*, 2015, 8(3): 480-498. (in Chinese)
- [31] 常津源, 熊聪, 祁琼, 等. 1 550 nm 高功率基横模半导体激光器及温度特性 [J]. 光学学报, 2023, 43(7):

0714003.

CHANG J Y, XIONG C, QI Q, *et al.* 1 550 nm High-power fundamental transverse mode semiconductor laser and its temperature characteristics [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(7): 0714003. (in Chinese)

[32] 汪丽杰, 佟存柱, 王延靖, 等. 半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展 [J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 895-911.

WANG L J, TONG C Z, WANG Y J, *et al.* Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2022, 15(5): 895-911. (in Chinese)



庞政(1999-),男,广西玉林人,硕士研究生,2021年于长春理工大学获得学士学位,主要从事高功率半导体激光器的研究。

E-mail: pangzheng23@mails.ucas.ac.cn



汪丽杰(1985-),男,河北新乐人,博士,研究员,2013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,主要从事高亮度半导体激光器和光子晶体激光器的研究。

E-mail: wanglijie@ciomp.ac.cn