

## 用于掺铒光纤放大器的高功率单模 980 nm 半导体激光芯片与模块

唐松, 张通, 赵勇明, 陈王义博, 张艳春, 杨国文\*

度亘激光技术(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215000

**摘要** 报道了应用于掺铒光纤放大器(EDFA)的高功率单模 980 nm 半导体激光芯片和泵浦模块。所研制的单基横模 980 nm 激光芯片的 kink-free 输出功率可达 1650 mW, 最高热反转功率可达 2.4 W。利用此芯片研制了 14 pin 蝶形封装模块, 采用光纤光栅进行波长锁定, 实现了单模输出功率超过 1300 mW 以及从阈值到 1300 mW 的大动态范围的波长锁定, 边模抑制比(SMSR)大于 30 dB, 峰值波长为  $974.5 \text{ nm} \pm 0.5 \text{ nm}$ , 光谱半峰全宽(FWHM)小于 0.5 nm, 带内功率占比(PIB)大于 95%。

**关键词** 激光器; 单模; 光纤光栅; 泵浦

**中图分类号** O475 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221283

掺铒光纤放大器(EDFA)是全光网络大容量通信的核心关键器件。980 nm 波长对应铒离子的高能级, 而 1550 nm 附近波段对应铒离子的亚稳态能级, 因此通过吸收波长为 980 nm 的高能量光子能够放大 1550 nm 附近波段的信号光, 从而实现光信号的放大和远距离传输<sup>[1-2]</sup>。高泵浦效率和低噪声 980 nm 半导体激光器是 EDFA 最理想的泵浦源和核心部件, EDFA 的工作原理如图 1 所示。通信容量的增加以及密集波分复用技术的应用对 980 nm 单模激光泵浦源的功率提出了更高要求<sup>[3]</sup>。限制高功率、高可靠性单模 980 nm 半导体激光芯片实现的主要技术瓶颈包括以下几个方面: 1) 热反转的功率限制; 2) 腔面光学灾变损伤的限制; 3) 光功率-电流曲线的 kink 或单模输出功率的限制; 4) 高功率密度和高电流密度下的高可靠性问题; 5) 大动态范围波长锁定和稳定工作的问题。基于以上原因, 实现高功率高稳定的单基横模 980 nm 半导体激光芯片及其泵浦模块具有极大挑战<sup>[4-5]</sup>。

国内在 980 nm 单模激光器的研究方面有很大进

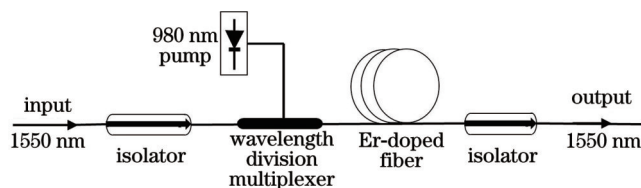


图 1 EDFA 光信号放大原理图

Fig. 1 Schematic of optical signal amplification in an EDFA

展, 但输出功率停留在 500 mW<sup>[6-7]</sup>, 而且商业产品的输出功率仅停留在 200~400 mW。近几年国外在这方面的研究相对较少<sup>[8]</sup>, 产品主要被 Lumentum 和 Coherent(原 II-VI)公司垄断, 这两家公司生产的光纤耦合模块的最高输出功率为 950~1000 mW。

为了解决通信级单模 980 nm 半导体激光芯片与模块的瓶颈问题, 本团队针对芯片设计、外延材料生长、前端制备工艺、后端制备工艺、封装测试分析及可靠性与失效分析等六大模块进行了系统性深入研究, 突破了芯片和模块研制过程中的诸多关键技术和工艺, 成功开发出了高功率、高效率和高可靠性单基横模半导体激光芯片与模块。

本团队采用 AlGaAs 材料体系和 InGaAs 量子阱, 结合非对称大光腔外延结构, 使光场向 N 型波导层偏移, 从而降低了光吸收损耗, 提高了芯片的电光转换效率; 利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统实现材料的外延生长, 采用刻蚀工艺制备脊波导结构激光器, 在芯片的前后腔面蒸镀高反膜和增透膜, 采用 AlN 热沉、AuSn 合金和 p-up 的封装方式封装成 COS(chip on submount)器件进行测试表征和老化实验。器件结构如图 2 所示, 脊波导的宽度约为  $5 \mu\text{m}$ , 腔长为 5 mm。在热沉温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时进行器件的测试。图 3(a)为典型单模 980 nm 激光芯片的功率和电光转换效率曲线, 单模 kink-free 输出光功率大于 1650 mW, 峰值电光转换效率达到了 60%(@630 mW/700 mA)。输出功率为 1300 mW 时, 典型的电光转换效率可达 52%。图 3(b)为不同电流下的慢轴远场分布, 可以看到从低

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2022-11-06; 录用日期: 2022-11-15

通信作者: \*yanggw@dogain.com

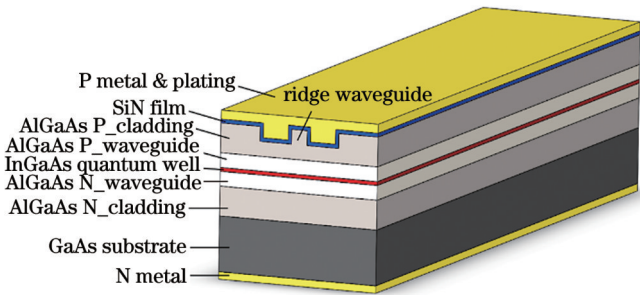


图 2 单模 980 nm 激光芯片结构示意图

Fig. 2 Schematic of 980 nm single-mode semiconductor laser chip

电流到 1.5 A 高电流,远场分布均呈现为良好的高斯分

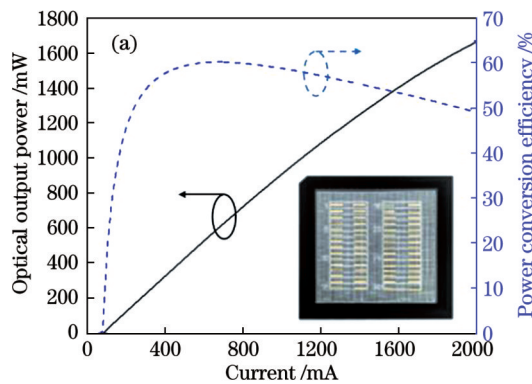


图 3 单模 980 nm 激光芯片的典型特性曲线。(a)输出光功率及电光转换效率随电流的变化(插图为芯片实物图);(b)不同电流下的慢轴远场发散角分布曲线(插图为 1500 mW 下的近场分布图)

Fig. 3 Typical characteristic curves of a 980 nm single-mode semiconductor laser chip. (a) Optical output power and power conversion efficiency versus current (inset: chips photo); (b) slow-axis far-field profile under different currents (inset: near-field profile at 1500 mW)

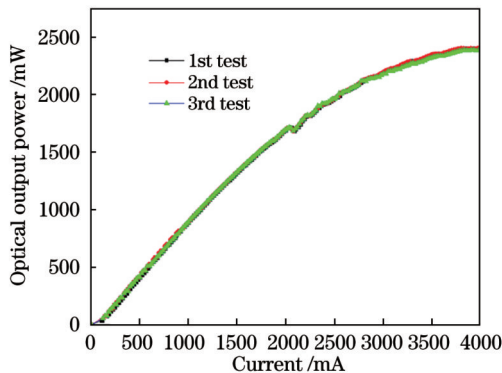
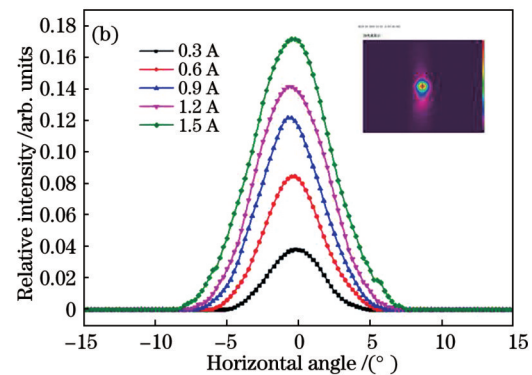


图 4 单模 980 nm 激光芯片在大电流测试下的光功率-电流曲线

Fig. 4 Optical power-current curves of 980 nm single-mode semiconductor laser chip under high injection current

在开发激光芯片的基础上,本团队进一步成功开发出了 14 pin 蝶形封装的高功率单模光纤耦合模块(采用光纤光栅锁定激光发射波长,采用优化的光纤透镜提高光纤耦合效率)。图 5(a)给出了光纤耦合模块的输出功率和光纤耦合效率随电流变化的典型曲线,可以看出模块的单模输出功率大于 1300 mW,并且此功率下的光纤耦合效率高达 80%。图 5(b)给出了模

布。图 3(b)中的插图是测试的近场光斑形貌,该近场光斑形貌表明激光芯片处于稳定的单基横模工作状态。

980 nm 芯片波导宽度一般为 4~6  $\mu\text{m}$ ,在高功率工作条件下,芯片承受着极高的电流密度和光功率密度,光学灾变损伤(COD)成为制约芯片性能的主要因素之一。图 4 为单模 980 nm 激光芯片在大电流测试下的光功率-电流测试曲线,可以看出:当注入电流为 4 A 时,芯片仍可以正常工作,未出现光学灾变损伤失效,其最高输出功率达到了 2.4 W,而且同一颗芯片的三次大电流重复测试未出现明显的功率衰减;在电流 2 A 下,三次测得的输出光功率分别为 1694、1692、1693 mW,基本保持不变。

块在不同输出功率下的激光光谱,可以看到光纤耦合模块在 50~1300 mW 的功率下均实现了稳定的波长锁定,中心波长稳定在  $974.5 \text{ nm} \pm 0.5 \text{ nm}$ ,光谱的半峰全宽(FWHM)小于 0.5 nm,边模抑制比(SMSR)均大于 30 dB,带内功率占比(PIB)均大于 95%,实现了从阈值到 1300 mW 的大范围动态波长锁定,可以满足光通信应用的需求。

通信对器件长期可靠性的要求极高,为此,本团队分别从芯片和模块两方面进行了充分的可靠性验证。图 6 是 21 只单模 980 nm 激光芯片在电流为 2 A、热沉温度  $T_{\text{Fix}}$  为 85  $^{\circ}\text{C}$  条件下老化 2066 h 后的可靠性测试曲线,该条件下的量子阱结温  $T_j$  约为 137  $^{\circ}\text{C}$ 。

芯片的随机失效率(FIT,在公式中记为  $R_{\text{FIT}}$ )<sup>[4]</sup>定义为

$$R_{\text{FIT}} = \frac{10^9 N \gamma}{t_{\text{tot}}}, \quad (1)$$

式中: $t_{\text{tot}}$ 是总的器件工作小时数; $N$ 是失效器件的数量; $\gamma$ 是置信水平因子。在置信水平为 60% 的情况下, $N\gamma$ 可以用  $N+1$  来近似代替。

在加速老化的情况下,可以基于以上长期可靠性测试数据,通过文献[4]中的老化模型来计算加速老化

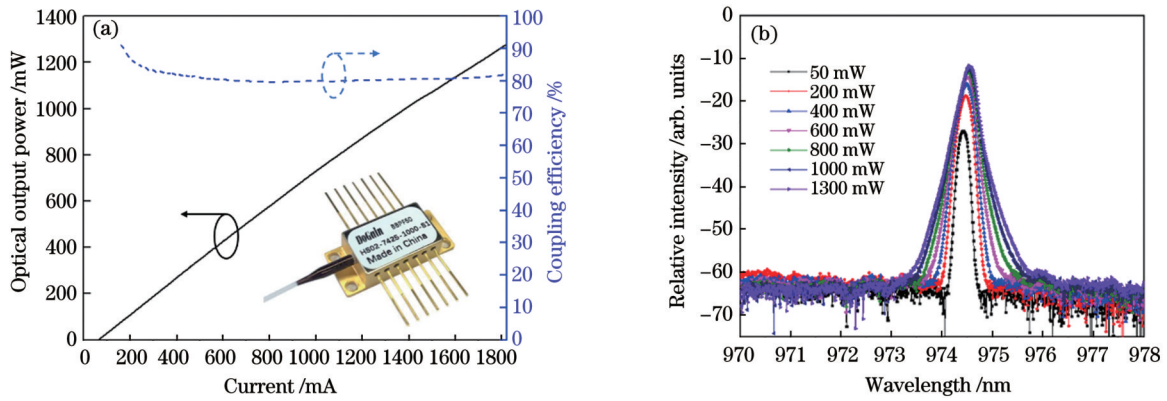


图 5 单模光纤耦合模块的典型特性曲线。(a)输出光功率及光纤耦合效率随电流的变化(插图为模块实物图);(b)不同功率下的光谱图

Fig.5 Typical characteristic curves of 980 nm single-mode coupling module. (a) Optical output power and fiber coupling efficiency versus current (inset: module photo); (b) spectra under various output powers

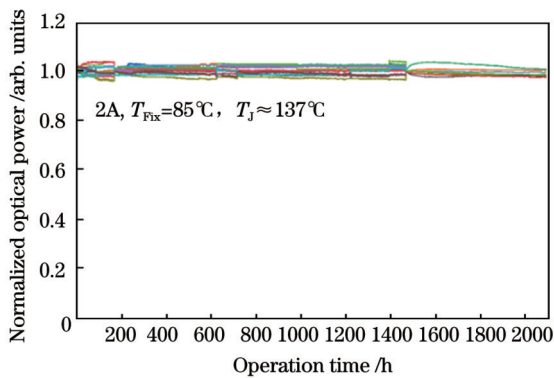


图 6 单模 980 nm 激光芯片的长期可靠性测试曲线(电流 2 A, 结温 137 °C)

Fig.6 Long life-time test curve of 980 nm single-mode laser chip under current of 2 A and junction temperature of 137 °C

的倍率。计算公式为

$$R_{FIT} \propto \left(\frac{I}{I_0}\right)^m \exp\left[\frac{E_a}{K_B}\left(\frac{1}{T_{j,0}} - \frac{1}{T_j}\right)\right], \quad (2)$$

式中: $m$ 为电流系数, $m=3.5$ ;  $E_a$ 为激活能, $E_a=0.45$  eV;  $K_B$ 为玻尔兹曼常数;  $T_{j,0}$ 和  $I_0$ 分别是额定工作条件下的结温和工作电流;  $T_j$ 和  $I$ 是相应的加速测试条件下的结温和电流。计算出加速倍率后,可以得到等效的实际工作条件下总的器件小时数,从而可以计算得到该芯片产品在 900 mW 和 1300 mW 工作条件下的可靠性分别优于 100FIT 和 500FIT。对应的 14 pin 蝶形封装模块实现了光纤输出功率为 600~1000 mW 的系列产品,并通过了 Telcordia GR-468-CORE 通信标准验证,可以满足 EDFA 对泵浦模块的可靠性要求。

通信级高功率单模 980 nm 半导体激光芯片及模块是 EDFA 的核心关键部件,本团队经过全面深入的细致研究,完成了芯片设计、材料生长、器件工艺制备、

腔面钝化与镀膜、光纤耦合和模块封装等技术的突破,实现了瓦级功率输出的高性能单基横模 980 nm 半导体激光芯片及模块,对于全光网络大容量通信和核心器件产品化具有重要意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 张珂卫, 赵卫, 谢小平, 等. 基于掺铒光纤的高增益低噪声光放大器实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506003. Zhang K W, Zhao W, Xie X P, et al. Experimental research of high gain and low noise figure optical amplifier based on erbium-doped fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506003.
- [2] 刘彬, 孙军强. C 波段和 980 nm 抽运的两段级联 L 波段掺铒光纤放大器[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 917-920. Liu B, Sun J Q. Gain enhancement of two-stage L-band EDFA pumped by C-band and 980 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(10): 917-920.
- [3] Sverdlov B, Pfeiffer H U, Zibik E, et al. Optimization of fiber coupling in ultra-high power pump modules at  $\lambda=980$  nm[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8605: 860508.
- [4] Yang G W, Smith G M, Davis M K, et al. Highly reliable high-power 980-nm pump laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2403-2405.
- [5] 郑晓刚, 李特, 芦鹏, 等. 980 nm 半导体激光器腔面温度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102004. Zheng X G, Li T, Lu P, et al. Analysis of temperature characteristics of 980 nm semiconductor laser facet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1102004.
- [6] 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.
- [7] 刘斌, 刘媛媛. 980 nm 高功率脊型波导半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091404. Liu B, Liu Y Y. High power 980 nm ridge waveguide semiconductor laser diode[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091404.
- [8] Mohrdiek S, Pfeiffer H U, Zibik E A, et al. Versatile 1 W narrow band 976 nm and 1064 nm light sources[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7953: 795310.

# High-Power Single-Mode 980 nm Semiconductor Laser Chip and Module for Erbium-Doped Fiber Amplifiers

Tang Song, Zhang Tong, Zhao Yongming, Chen Wangyibo, Zhang Yanchun, Yang Guowen\*  
*Dogain Laser Technology (Suzhou) Co. Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China*

## Abstract

**Objective** For erbium-doped fiber amplifier (EDFA) pumping sources, 980 nm single-mode semiconductor lasers and modules are widely used. These modules, which are driven by dense wavelength division multiplexing (DWDM) in optical communication systems and yield more than 1 W of output power, are in high demand. However, achieving more than 1 W of output power is challenging owing to the restrictions caused by thermal rollover, catastrophic optical damage (COD), kinks in the light-current curve, reliable operation range, and wide-ranging stable wavelength locking requirements. This paper presents the development of high-power single-transverse-mode 980 nm semiconductor laser and modules. By adopting advanced chip designs, sophisticated device fabrication procedures, specific facet coating processes, and advanced module packaging, output power levels of 1650 and 1300 mW are achieved for the chip and module, respectively.

**Methods** To fabricate the single-mode 980 nm semiconductor laser, an asymmetric epitaxial design was applied, and a material was grown via metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). Ridge waveguides were formed during device fabrication. A wafer was cleaved into bars with high- and low-reflection coatings on its two facets. Singulated chips were mounted p-side up on AlN submounts bonded by an AuSn alloy. A fiber Bragg grating and an optimized fiber lens were integrated to manufacture a standard 14 pin butterfly module with superior performance.

**Results and Discussions** The developed single-mode 980 nm semiconductor laser yields a high kink-free output power of 1650 mW with a maximum rollover power of 2.4 W. No failure is observed during the test involving a maximum driving current of 4 A. An accelerated long-life test is performed using 21 units of 5 mm long semiconductor lasers under an injection current of 2 A and a junction temperature of 137 °C. The life test is conducted for more than 2000 h without failure. For the 14 pin butterfly module, wavelength locking over a wide range is accomplished under various power levels and temperatures. The kink-free fiber output power of the module exceeds 1300 mW. In the operating power range from 10 to 1300 mW, the wavelength is stable and locked at  $974.5 \text{ nm} \pm 0.5 \text{ nm}$ , with a side mode suppression ratio (SMSR) exceeding 30 dB, a spectral bandwidth (full width at half-maximum) of less than 0.5 nm, and a power-in-band (PIB) exceeding 95%. The module performance fulfills the EDFA application requirements for telecommunication systems and satisfies the Telcordia GR-468-CORE standard.

**Conclusions** A single-mode 980 nm diode chip and module are investigated comprehensively. Both the chip and module achieve superior characteristics with kink-free single-mode power levels of 1650 and 1300 mW, respectively. Accelerated life testing shows the reliable operation of the chip and module, which satisfy the requirements of telecommunication and other applications.

**Key words** lasers; single-mode; fiber Bragg gratings; pumping