

文章编号: 1000-7032(2016)01-0033-05

# 光谱稳定的低功耗 980 nm 单模泵浦源半导体激光器

李 辉\*, 都继瑶, 曲 轶, 张 晶, 李再金, 刘国军

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 由于在很多特殊应用领域要求 980 nm 泵浦源半导体激光器具有光谱稳定、低功耗等, 本文通过对 980 nm 单模半导体激光器的腔长、腔面反射率及光纤光栅反射率等优化设计, 研制出低阈值、高功率 980 nm 光纤光栅外腔波长稳定半导体激光器。该低功耗、波长稳定的单模半导体激光器, 在 100 mA 工作电流下尾纤输出功率达到 51 mW, 3 dB 带宽为 0.16 nm, 边模抑制比大于 40 dB, 器件在 250 mA 工作电流下, 尾纤输出功率达到 120 mW。

**关键词:** 半导体激光器; 光纤布拉格光栅; 外腔结构; 波长稳定; 低功耗

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20163701.0033

## Low Power Dissipation 980 nm Single Mode Pumping Source Laser with Wavelength Stabilization

LI Hui\*, DU Ji-yao, QU Yi, ZHANG Jing, LI Zai-jin, LIU Guo-jun

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding Author, E-mail: lihui@cust.edu.cn

**Abstract:** Due to many special applications, the 980 nm pumping source semiconductor lasers should have the characteristics of spectrum stability, low power consumption. Based on the optimization design of a 980 nm single mode semiconductor laser cavity length, cavity reflectivity and fiber Bragg grating reflectivity, the low threshold, high power 980 nm fiber Bragg grating external cavity semiconductor lasers with wavelength stability are developed. The pigtail output power of the low power consumption single mode semiconductor lasers with wavelength stability can reach 51 mW under 100 mA, 3 dB bandwidth of 0.16 nm. The side mode suppression ratio (SMRS) is greater than 40 dB. The pigtail output power of the device can reach 120 mW under 250 mA.

**Key words:** semiconductor laser; fiber bragg grating (FBG); external cavity structure; wavelength stabilization; low power dissipation

## 1 引 言

近年来,掺铒光纤放大器(EDFA)在光纤通信中获得了广泛的应用。一个光纤放大器(ED-

FA)要用一个或两个泵浦激光器组件,因此,980 nm 单模光纤光栅泵浦源半导体激光器有很大的市场需求。随着半导体量子阱材料生长技术、激光器芯片技术及装配技术的逐步完善,高功率半

收稿日期: 2015-09-12; 修订日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(U1330136); 高功率半导体激光国家重点实验室基金(9140C310205130C31004); 长春市科技计划(13KG30)资助项目

半导体激光器在国外得到了迅速发展<sup>[1-4]</sup>。目前国际上研制、生产高功率 980 nm 光纤光栅外腔半导体激光器的公司主要有 Oclaro、JDSU、Furukawa、3S Photonics 等。目前,国外公司已经有输出功率达到 1.05 W 的 980 nm 单模大功率光纤光栅泵浦源半导体激光器产品出售。

由于对 980 nm 单模光纤光栅泵浦源半导体激光器的需求增加,国内从 90 年代就开始了该器件的研制工作。但是到目前为止,还没有性能可靠的产品出售。国内在高功率 980 nm 半导体激光器方面的研制主要有中科院半导体研究所<sup>[5-8]</sup>、北京工业大学<sup>[9]</sup>、河北工业大学<sup>[10-11]</sup>、上海理工大学<sup>[12]</sup>、中科院长春光机与物理所<sup>[13]</sup>、长春理工大学<sup>[14]</sup>等单位。由于国内工业条件和加工技术与国外有明显的差距,所研制的器件在寿命和可靠性方面还有很大的不足。

另外,980 nm 单模半导体激光器作为掺铒光纤光源的泵浦源在很多特殊领域都有重要应用,其中一些应用领域要求泵浦源半导体激光器具有光谱稳定、低功耗等特性。现在商用器件的主要问题是功耗比较大,温度特性差,不利于应用于太空等苛刻的工作环境中,而这种光谱稳定、低功耗的 980 nm 光纤光栅泵浦源半导体激光器在国内外开展研究的单位较少。本文研制的 980 nm 单模光纤光栅泵浦源半导体激光器具有输出功率高、能耗低及光谱稳定等优点,可以应用于某些复杂环境中。

## 2 980 nm 光纤光栅外腔结构单模泵浦源半导体激光器的研制

### 2.1 980 nm 光纤光栅外腔结构泵浦源半导体激光器的设计和特性模拟

一般 F-P 腔半导体激光器输出激光的相干性较差,相干长度约为几毫米。采用光纤光栅外腔光反馈使特定波长的光反馈进入 F-P 腔,使该波长的光得到进一步放大增强,其他波长的光受到抑制,以实现稳频工作的目的。光纤光栅作为外腔结构的光学反馈部件,具有制作工艺简单、反射谱窄、中心波长稳定的优点,本文采用布拉格光纤光栅(FBG)作为外腔激光器的反馈元件,实现其波长锁定。

本文将单模光纤前端制作成楔形柱透镜并在单模光纤中置入光纤光栅(FBG)形成外腔半导体激光器(External cavity laser)。图 1 为光纤光栅外腔激光器原理图。光纤光栅通过楔状耦合端与

半导体激光器芯片实现光学直接耦合,具有结构简单、耦合效率高的优点,易于实现器件耦合结构的长期稳定。

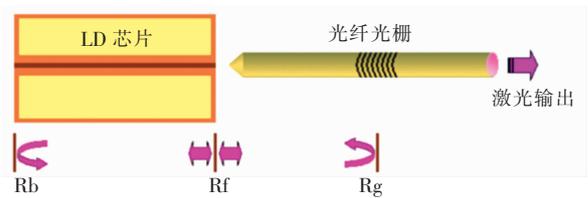


图 1 光纤光栅外腔结构半导体激光器原理图

Fig. 1 Principle diagram of the fiber grating external cavity structure semiconductor laser

为了使光纤光栅外腔结构半导体激光器实现低功耗工作,我们对半导体激光器芯片的腔长、腔面反射率和光纤光栅的反射率进行了优化设计。通过理论计算,获得了 980 nm 光栅外腔结构半导体激光器输出功率与注入电流的关系模拟曲线,如图 2 所示。当芯片腔长为 0.75 mm、腔面有效反射率为 5% 时,光栅外腔结构半导体激光器在 100 mA 注入电流下的输出功率可达到 65 mW 以上。所以,在制作 980 nm 单模半导体激光器芯片时,我们将其腔长设计为 0.75 mm。

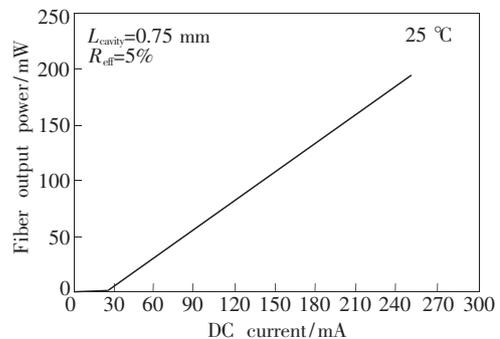


图 2 980 nm 光栅外腔结构半导体激光器输出功率与注入电流的模拟关系曲线

Fig. 2 Simulation curve between output power and injection current of 980 nm grating external cavity structure semiconductor laser

### 2.2 980 nm 半导体激光器外延结构设计及材料生长

本文研制的 980 nm 单模光纤光栅半导体激光器的特点是输出功率高、能耗低及光谱稳定,这就要求 980 nm 单模半导体激光器芯片具有低阈值、高效率的特点。经过优化设计的 980 nm 半导体激光器材料的外延结构如表 1 所示。采用金属有机化学汽相沉积系统(MOCVD)进行半导体激

光器的材料外延生长。

表 1 In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs 980 nm 半导体激光器材料外延结构

Tab. 1 In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs epitaxial structure of 980 nm semiconductor laser

Layer	Al comp.	Thickness/ nm	Doping /cm <sup>-3</sup>
GaAs	0	200	~1E20 (p) Zn
AlGaAs→ GaAs	0.6 - 0	150	~1E18 (p) Zn
AlGaAs	0.6	1 000	~1E18 (p) Zn
AlGaAs	0.6	100	i
GaAs→ AlGaAs	0 - 0.6	150	i
GaAs	0	12	i
InGaAs (single QW)	In (0.2)	7.3	i
GaAs	0	12	i
AlGaAs→ GaAs	0.6 - 0	150	i
AlGaAs	0.6	1 000	~1E18 (n) Si
GaAs→ AlGaAs	0 - 0.6	150	~1E18 (n) Si
GaAs buffer	0	250	~1E18 (n) Si
n <sup>+</sup> (100) GaAs substrate	0	a. u.	~1E18 (n) Si

### 2.3 980 nm 单模半导体激光器芯片制作和特性

目前单模半导体激光器的条形结构主要有脊形波导结构 (RW)、掩埋异质结 (BH) 结构、沟道衬底内条形 (VSIS) 结构等。其中脊形波导半导体激光器具有工艺简单、基模输出功率大的优点, 是目前大功率单模半导体激光器的优选条形波导结构。在本文中采用干法和湿法相结合的刻蚀工艺制作脊形波导结构器件<sup>[15]</sup>。

我们利用安装在积分球上的经校准的 InGaAs 探测器对输出功率与注入电流的特性进行测量。图 3 是不同温度 (25, 40, 50, 70 °C) 下的 3 μm × 750 μm

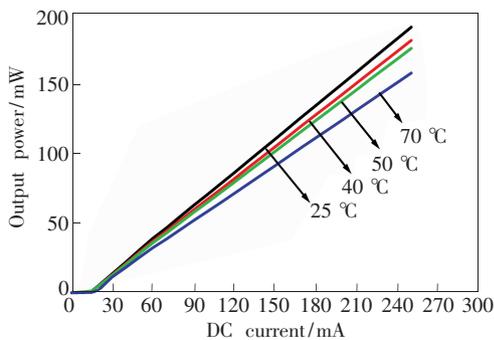


图 3 980 nm 单模半导体激光器在不同温度下的功率-电流曲线

Fig. 3 Power-current curve of 980 nm single mode semiconductor laser at different temperatures

980 nm 半导体激光器的功率-电流特性曲线, 图 4 是工作电流为 100 mA 时的器件的远场曲线。从图 3 可以看出, 在工作电流为 250 mA 时 (25 °C), 激光器的输出功率达到 170 mW 以上。激光器的阈值电流为 20 mA。器件在 70 °C 时仍然可以正常工作, 说明器件具有很好的温度特性。

图 4 是 980 nm 单模半导体激光器芯片在工作电流为 100 mA 时的远场曲线。器件的水平发散角和垂直发散角分别为 9° 和 28°。

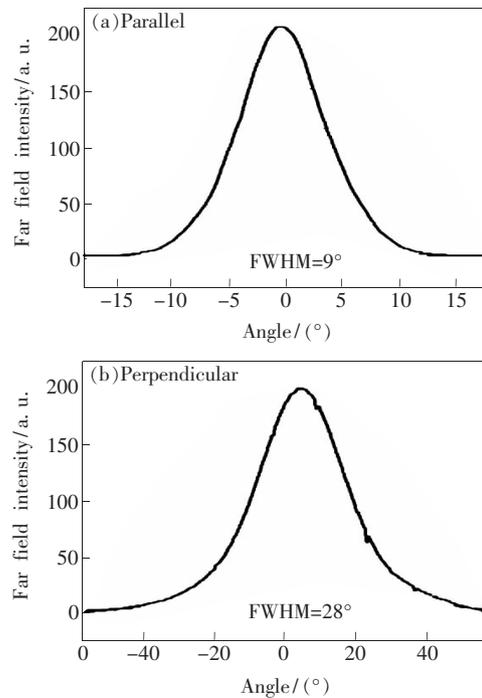


图 4 980 nm 单模半导体激光器的水平 (a) 与垂直 (b) 发散角曲线

Fig. 4 Horizontal (a) and vertical (b) divergence of 980 nm single mode semiconductor laser

### 2.4 耦合端面的设计、制备与耦合工艺

本文采用楔形柱面透镜光纤进行器件的直接耦合输出。为设计出理论上最佳楔型透镜耦合光学系统, 我们对该模型作如下假定: (1) 980 nm 单模高效率半导体激光器与微透镜单模光纤的模场的高斯近似; (2) 忽略微透镜光纤端的菲涅尔反射损耗; (3) 考虑到光纤中纤芯和包层的折射率相差很小, 用同一折射率表示它们。激光器与光纤的耦合实质上是模态的匹配问题, 当模态不匹配时, 耦合效率很低。光纤头的楔形透镜相当于在光纤端面上加了一个微透镜, 起到一个传输因子的作用, 就是利用这个传输因子使激光器与光

纤的模式达到匹配。耦合模型如图 5 所示。

由模拟结果可知,当光纤透镜的曲率半径为  $3.1 \mu\text{m}$ 、楔角约为  $48^\circ$ 、工作距离为  $5.1 \mu\text{m}$  时,器件的耦合效率最高。我们的实际耦合效率达到 70% 以上。

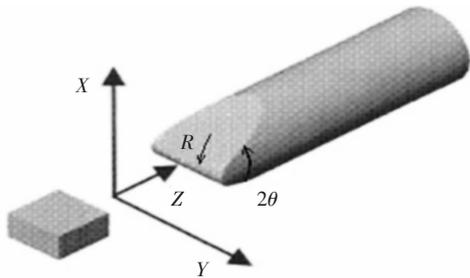


图 5 980 nm 单模半导体激光器光纤耦合结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fiber coupling 980 nm single mode semiconductor laser

## 2.5 980 nm 单模泵浦源半导体激光器特性

图 6 是采用光纤光谱仪测试的器件的输出光

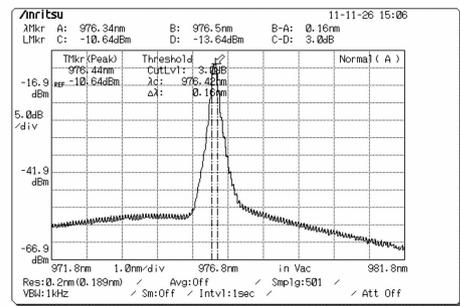


图 6 980 nm 光纤光栅泵浦源半导体激光器的输出光谱  
Fig. 6 Emitting spectrum of 980 nm fiber grating pumped semiconductor laser

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] DUTTA N K, LOPATA J, CHO A Y. Performance characteristics of GaInAs/GaAs large optical cavity quantum well lasers [J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27:680-682.
- [ 2 ] VERDIELL J M, ZIARI M, WELCH D F. Low-loss coupling of 980 nm GaAs laser to cleaved single mode fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1996, 32(19):1817-1818.
- [ 3 ] LIN G, YEN S T, LEE C P, *et al.*. Extremely small vertical far-field angle of InGaAs-AlGaAs quantum-well lasers with specially designed cladding structure [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(12):1588-1590.
- [ 4 ] APOLLONOV V V. 用于高功率激光器的光学元件 [J]. *中国光学*, 2013, 6(1):1-8.  
APOLLONOV V V. Optics for high power lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2013, 6(1):1-8. (in English)
- [ 5 ] 徐遵图, 杨国文, 徐俊英, 等. MBE 生长高功率转换效率 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器 [J]. *半导体学报*, 1999, 20(3):194-199.  
XU Z T, YANG G W, XU J Y, *et al.*. High power conversion efficiency InGaAs/GaAs/AlGaAs strained layer quantum well lasers grown by MBE [J]. *Chin. J. Semicond.*, 1999, 20(3):194-199. (in Chinese)
- [ 6 ] YANG G W, XU J Y, XU Z T, *et al.*. Theoretical investigation on quantum well lasers with extremely low vertical diver-

谱,其中心波长为 976.42 nm,3 dB 带宽为 0.16 nm,边模抑制比为 43 dB。

图 7 为 980 nm 光纤光栅泵浦源半导体激光器的输出功率与工作电流的关系曲线。在 250 mA 工作电流下,激光器的输出功率达到了 120 mW。

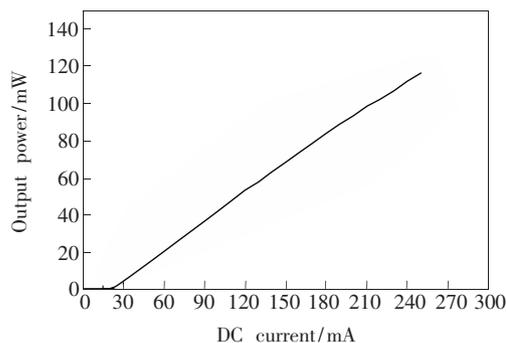


图 7 980 nm 光纤光栅泵浦源半导体激光器的功率-电流特性曲线

Fig. 7  $P-I$  characteristic curve of 980 nm fiber grating pumped semiconductor laser

## 3 结 论

采用 980 nm 单模半导体激光器与楔形光纤光栅耦合,制作出高效率、低功耗、波长稳定的 980 nm 单模泵浦源半导体激光器,耦合效率达到 70% 以上。在 100 mA 工作电流下,尾纤输出功率达到 51 mW。器件的中心波长为 976.42 nm,3 dB 带宽为 0.16 nm,其边模抑制比大于 40 dB。器件在 250 mA 工作电流下,尾纤输出功率达到 120 mW。

- gence and low threshold current [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(1):8-14.
- [7] ZHU X P, XU Z T, ZHANG J M, *et al.*. A single mode 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs large optical cavity quantum well laser with low vertical divergence angle [J]. *J. Semicond.*, 2002, 23(4):342-346.
- [8] 徐遵图,徐俊英,杨国文,等. InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器 [J]. *中国激光*, 1999, 26(5):7-11.  
XU Z T, XU J Y, YANG G W, *et al.*. InGaAs/AlGaAs strained layer quantum well lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, 26(5):7-11. (in Chinese)
- [9] 俞波,盖红星,韩军,等. 应变 InGaAs/GaAs 量子阱 MOCVD 生长优化及其在 980 nm 半导体激光器中的应用 [J]. *量子电子学报*, 2005, 22(1):81-84.  
YU B, GAI H X, HAN J, *et al.*. Optimization of MOCVD-growth strain InGaAs/GaAs quantum wells and its application for 980 nm LD [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2005, 22(1):81-84. (in Chinese)
- [10] 杜向硕,康志龙,安振峰,等. 光纤光栅外腔半导体激光器锁模特性 [J]. *半导体技术*, 2013, 38(9):672-675.  
DU X S, KANG Z L, AN Z F, *et al.*. Mode-locked characteristics for fiber grating external cavity semiconductor lasers [J]. *Semicond. Technol.*, 2013, 38(9):672-676. (in Chinese)
- [11] 刘洋洋,杨瑞霞,袁春生,等. 974 nm 半导体激光器的光纤耦合研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(11):1102003-1-6.  
LIU YY, YANG R X, YUAN C S, *et al.*. Study on fiber coupling for 974 nm semiconductor laser diode [J]. *Chin. J. Lasers*, 2014, 41(11):1102003-1-6. (in Chinese)
- [12] 李毅,黄毅泽,王海方,等. 980 nm 半导体激光器双布拉格光纤光栅波长锁定器 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1468-1475.  
LI Y, HUANG Y Z, WANG H F, *et al.*. Wavelength stabilizer with dual fiber Bragg grating for 980 semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1468-1475. (in Chinese)
- [13] 王立军,彭航宇,张俊. 大功率半导体激光合束进展 [J]. *中国光学*, 2015, 8(4):517-534.  
WANG L J, PENG H Y, ZHANG J. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chin. Opt.*, 2015, 8(4):517-534. (in Chinese)
- [14] 李再金,李特,芦鹏,等. 980 nm 半导体激光器腔面膜钝化新技术 [J]. *发光学报*, 2012, 33(5):525-528.  
LI Z J, LI T, LU P, *et al.*. The novel passivation method for 980 nm semiconductor laser diode face coating [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(5):525-528. (in Chinese)
- [15] 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)



李辉(1971-),女,吉林长春人,博士,副研究员,2014年于长春理工大学获得博士学位,主要从事半导体激光器等方面的研究。

E-mail: lihui@cust.edu.cn