

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1067-03

高斜率效率 L 波段宽带可调谐光纤环形腔激光器

董新永¹⁾²⁾ 关柏鸥¹⁾ 文伟成¹⁾ 谭华耀¹⁾ 董孝义²⁾

(1), 香港理工大学电机工程系, 香港 九龙
(2), 南开大学现代光学研究所, 天津 300071

摘要: 利用环形腔结构在 L 波段获得了 43 nm(1567.1 nm ~ 1610.1 nm)范围的宽带连续可调谐激光输出。由于同时采用了高浓度掺铒光纤和 1480 nm 激光二极管(LD)抽运源,极大地降低了激光器的抽运阈值,提高了斜率效率和输出功率。在整个可调谐范围内,激光器的输出功率达 10.9 dBm ~ 12.1 dBm(95 mW 抽运),信噪比高于 60 dB,在 1585 nm 的斜率效率为 0.201。

关键词: 掺铒光纤; 光纤环形腔激光器; L 波段; 波长可调谐; 斜率效率

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

近年来,掺铒光纤放大器的可利用增益波段已经从常规的 C 波段,即 1525 nm ~ 1565 nm,扩展到 C+L 波段,即 1525 nm ~ 1610 nm。L 波段掺铒光纤放大器的增益不但带宽大,还具有天然的平坦性,所以在波分复用系统中的应用受到越来越多的重视^[1-3]。L 波段的宽带可调谐激光器作为这种宽带波分复用系统测试所必需的器件,近年来引起了很大的研究兴趣^[4-7]。与外腔半导体激光器相比,光纤激光器虽然调谐带宽受到增益带宽的限制,但是具有低的相干性和偏振特性,因此是较为理想的测试光源^[5]。最近的报道已经将掺铒光纤激光器的连续可调谐波长范围拓展到 100 nm 以上^[7],但是在 L 波段,高的抽运阈值和低的工作效率仍然是其实用化的一大障碍。

近年来,国内对短腔和环形腔掺铒光纤激光器的研究也有许多报道^[8-10],但都集中在 C 波段的研究上,对 L 波段激光器的研究尚未有报道。本文同时采用抽运效率较高的 1480 nm 半导体激光二极管(相对于 980 nm 半导体激光二极管比较而言)和高浓度的掺铒光纤,极大地降低了 L 波段环形腔激光器的抽运阈值,提高了其工作效率。在 43 nm 的可调谐范围内,激光器的输出功率达 10.9 dBm ~ 12.1 dBm(95 mW 抽运),信噪比高于 60 dB,其在 1585 nm 的斜率效率为 0.201。

2 激光器理论

图 1 所示为本实验装置的示意图。所用器件包括波长为 1480 nm 的激光二极管抽运源、1480 nm/1590 nm 波长选择耦合器(WDM)、隔离器(isolator)、偏振控制器(PC)、可调谐光纤法布里-珀罗(FPF)滤波器和 3dB 光纤耦合器。铒光纤的正向放大自发辐射光经过光纤法布里-珀罗滤波器滤波后,经光纤耦合器分光,50%的光被反馈回环形腔内,激光从耦合器的另一端输出。

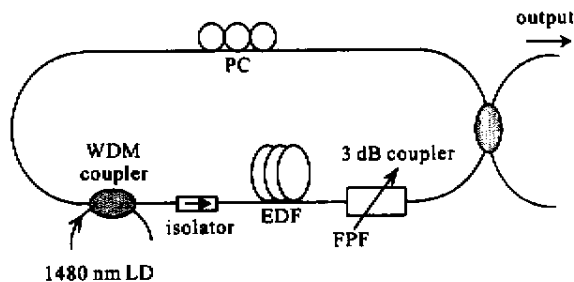


Fig. 1 The schematic diagram of the designed L-band fiber ring laser

由于光隔离器和光纤法布里-珀罗滤波器的存在,环形腔内只能在一个方向产生与光纤法布里-珀罗滤波器的某个通带波长相同的激光。假设这个共振波长为 λ_r ,在抽运功率高过阈值的情况下,激光器的输出功率可表示为

$$P_r^{out} = P_r^{in} \cdot G \cdot V_1(1 - R), \quad (1)$$

其中, P_r^{in} 为进入铒光纤前端的光功率, V_1 是描述从铒光纤末端到输出端损耗的传输因子, R 是输出耦合器的反馈比(对于 3 dB 耦合器 $R = 0.5$), G 是整

段铒光纤的增益,而且有下列关系成立

$$G = 1/(R \cdot V), \quad (2)$$

其中, V 是描述整个环路中被动光纤损耗的传输因子。由文献 [11] 的理论推导可知,激光器的输出功率、抽运阈值 P_p^{th} 和斜率效率 η 可分别表示为

$$P_{out,r} = \eta(P_p - P_p^{th}), \quad (3)$$

$$P_p^{th} = \frac{\lambda_r}{\lambda_p} \frac{\alpha_s L - \ln(V \cdot R)}{1 - (V \cdot R \cdot G_{max})^{-\delta}} P_s^{sat}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\lambda_p}{\lambda_r} V_1 \frac{1 - R}{1 - VR} [1 - (VRG_{max})^{-\delta}], \quad (5)$$

其中, λ_p 为抽运波长, α_s 、 α_p 分别为铒光纤对信号光和抽运光的吸收系数, L 为铒光纤的长度, P_s^{sat} 、 P_p^{sat} 分别为信号光和抽运光的饱和功率, $G_{max} = \exp[(\alpha_p/\delta - \alpha_s)L]$ 为抽运功率无穷大时在 λ_r 可获得的最大增益, $\delta = (\lambda_r P_s^{sat}) / (\lambda_p P_p^{sat})$ 。

3 实验结果与讨论

实验中掺铒光纤长度为 20 m, 纤芯的铒离子掺杂浓度约为 $9.46 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ (体积粒子数), 纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.29, 截止波长为 1000 nm。所用 1480 nm 激光二极管抽运源的最大输出功率可达 95 mW。光纤法布里-珀罗滤波器的自由光谱范围(FSR)为 43.6 nm, 带通宽度为 0.3 nm, 插入损耗为 2.85 dB。输出激光的波长和功率分别用 AQ6330 光谱分析仪和光功率计进行测量。

L 波段光纤环形腔激光器的输出谱如图 2 所示。通过改变光纤法布里-珀罗滤波器的驱动电压, 可以实现其带通波长的线性调谐, 进而对激光器的输出波长进行线性调谐。实验中在 1567.1 nm ~ 1610.1 nm 的范围内得到了单波长的激光输出。在此范围内, 输出激光的功率均高于 10.9 dBm (12.3 mW), 最高达

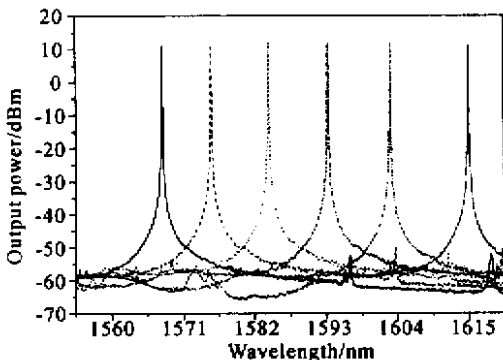


Fig.2 Output spectra of L-band erbium-doped fiber ring laser

到 12.1 dBm (16.2 mW), 信噪比均高于 60 dB。激光器的输出功率随波长的变化如图 3。

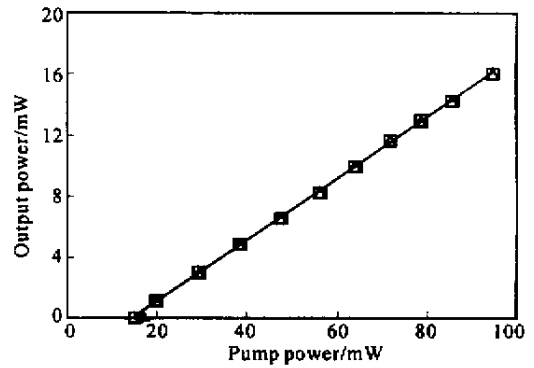


Fig.3 Output power versus lasing wavelength

图 4 所示为激光器在 1585 nm 的输出功率随抽运功率的变化。图中方点对应于抽运功率上升的情况, 三角点对应于抽运功率下降的情况。实验测得在抽运功率上升和下降两种不同情况下, 激光器的阈值略有差异, 分别为 16.8 mW 和 15.2 mW。这种现象与文献 [5, 12] 的报道是一致的, 是由铒光纤的饱和吸收效应造成的。在阈值点附近, 抽运光功率比正常工作状态下小得多, 而 L 波段激光器所需的铒光纤又比较长, 因此抽运光的绝大部分能量被铒光纤的前一部分吸收, 最末段部分的铒光纤中抽运光很弱或者没有, 不足以使其达到粒子数反转状态。这部分铒光纤将表现为纯的吸收, 其饱和吸收效应使形成激光后的腔内损耗小于之前的腔内损耗, 因此导致上升阈值高于下降阈值。由实验数据计算得到斜率效率为 0.201。另外, 激光器工作在不同波长时, 阈值功率略有变化, 这与铒光纤在不同波长的吸收截面和发射截面及腔内损耗差异等因素有关。

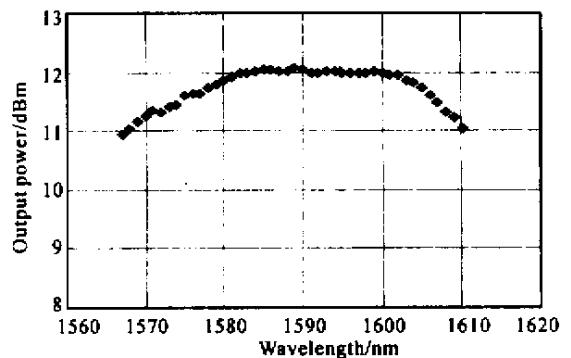


Fig.4 Output power versus pump power at lasing wavelength 1585 nm

与文献 [5] 报道的 57 mW 和 40 mW 的上升下降阈值相比, 本文的阈值要低得多, 斜率效率也高得

多。我们认为,选用波长为 1480 nm 的激光二极管做抽运源,以及采用高掺杂浓度的铒光纤是提高激光器性能的主要原因。由于相同功率的 1480 nm 抽运光的光子数是 980 nm 抽运光的 1.5 倍多,所以具有高得多的量子效率。尤其是在低抽运功率情况下,前者可以更容易达到粒子数反转,因此可以降低阈值。采用高浓度掺铒光纤可以减小光纤长度,从而降低铒光纤的被动吸收损耗和反向放大自发辐射的能量积累^[2],因此也有利于降低阈值和提高效率。另外,由理论公式(5)可知,损耗因子 V_1 对斜率效率的影响很大,如果将光纤法布里-珀罗滤波器移到输出耦合器后面的环路里将有效地减小 V_1 ,从而提高斜率效率。但是,这样铒光纤产生的放大自发辐射(ASE)噪声将和激光一起经耦合器输出端直接输出,因此要付出信噪比降低的代价。

根据文献[5]的报道,L波段光纤环形腔激光器的输出激光为多模,线宽在 200 MHz ~ 300 MHz 之间,对应的相干长度约为 1 m。由于腔内设有偏振选择器件,通过适当调节偏振控制器(PC)可以保持输出激光为零偏振状态,还可以使被动器件(光纤法布里-珀罗滤波器,隔离器等)的偏振相关损耗及 EDF 的偏振相关增益维持不变。

结论 在环形腔结构内利用可调光纤法布里-珀罗滤波器获得了 L 波段宽带连续可调谐激光输出。由于同时采用了 1480 nm 激光二极管抽运源和高浓度掺铒光纤,降低了激光器的抽运阈值,提高了斜率效率和输出功率。在抽运功率为 95 mW 条件下,激光器的调谐范围达 43 nm(1567.1 nm ~ 1610.1 nm),输出功率可达 12.1 dBm(16.2 mW),信噪比高于 60 dB,在 1585 nm 的斜率效率为 0.201。

参 考 文 献

- [1] Ono H, Yamada M, Kanamori T *et al.*. 1.58- μm band gain-flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):490 ~ 496
- [2] Flood F A. L-band erbium-doped fiber amplifiers. *Proc. OFC'00*, Baltimore, Maryland, 2000, paper WG1
- [3] Dong Xinyong, Yuan Shuzhong, Kai Gunyun *et al.*. L-band fiber amplifiers and their development. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2002, **19**(3):193 ~ 199 (in Chinese)
- [4] Tabuchi H, Ishikawa H. External grating tunable MQW laser with tuning rang of 240 nm. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(11):742 ~ 743
- [5] Oh J M, Choi H B, Lee D *et al.*. Efficient tunable fiber ring laser for 1580 nm band with a fiber Bragg grating. *Proc. OFC'01*, Anaheim, California, 2001, paper WA6
- [6] Yamashita S, Nishihara M. Widely tunable erbium-doped fiber ring laser covering both C-band and L-band. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2001, **7**(1):41 ~ 43
- [7] Bellemare A, Karasek M, Riviere C *et al.*. A broadly tunable erbium-doped fiber ring laser: Experimentation and modeling. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2001, **7**(1):22 ~ 29
- [8] Guan Bai'ou, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo *et al.*. Tunable All Fiber Erbium-doped Fiber Ring Laser with Large Tuning Range. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(3):197 ~ 199 (in Chinese)
- [9] Ding Lei, Kai Gunyun, Yuan Shuzhong *et al.*. A four-wavelength all-fibre laser for wavelength division multiplexing system. *Chinese Phys. Lett.*, 2001, **18**(3):376 ~ 378
- [10] Zhang Ying, Kai Gunyun, Yuan Shuzhong *et al.*. Short-cavity Er/Yb-P/Al/Si co-doped fibre grating laser. *Chinese Phys. Lett.*, 2001, **18**(5):641 ~ 642
- [11] Pfeiffer T, Schmuck H, Blow H. Output power characteristics of Erbium-doped fiber ring lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8):847 ~ 849
- [12] Kim S K, Chu M J, Lee J H. L-band multi-wavelength erbium-doped fiber laser. *Proc. OFC'01*, Anaheim, California, 2001, paper WDD19

Widely Tunable L-Band Fiber Ring Laser with High Slope Efficiency

Dong Xinyong¹⁾²⁾ Guan Bai'ou¹⁾ Man Waising¹⁾ Tam Hwayaw¹⁾ Dong Xiaoyi²⁾

(1), Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong

(2), Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

(Received 26 June 2001; revised 13 November 2001)

Abstract: Efficient L-band (long wavelength band) fiber ring laser with tunable range of 43 nm (1567.1 nm ~ 1610.1 nm) is demonstrated. Both high concentration Erbium-doped fiber and 1480 nm pump laser diode (LD) were used to depress the laser threshold pump power and to increase the slope efficiency. Output powers between 10.9 dBm and 12.1 dBm were achieved when 95 mW pump power was provided. And the signal-to-noise ratio was better than 60 dB. A high slope efficiency of 0.201 was obtained at lasing wavelength of 1585 nm.

Key words: Erbium-doped fiber; fiber ring laser; L-band; wavelength tunable; slope efficiency