

L 波段可调谐线形腔 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器*

董法杰 张书敏 吕福云 王宏杰

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要 报道了一种结构简单、工作在 L 波段、可调谐的线形腔 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器。利用由两段高双折射光纤和两个偏振控制器构成的环镜滤波器对激光器进行调谐, 使调谐范围达到 34 nm, 功率起伏小于 ± 0.2 dB。用 976 nm 多模 LD 泵浦 Er/Yb 共掺双包层光纤产生的 ASE 作为二次泵源, 对未泵浦的一段光纤进行泵浦, 使腔内 Er/Yb 共掺光纤的增益谱移到 L 波段; 多个泵浦源同时对 Er/Yb 共掺双包层光纤进行侧向泵浦, 使激光器输出功率超过了 200 mW。

关键词 L 波段; 线形腔; 可调谐; Er/Yb 共掺双包层光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

随着光通信系统对传输容量要求的不断提高, L 波段的波分复用技术及其器件的研究逐渐受到青睐。作为通信光源和放大器测试光源的 L 波段光纤激光器已有了大量的研究报道^[1-4]。因掺 Er³⁺ 光纤激光器工作在光通信窗口, 故多数研究仅限于 L 波段掺 Er³⁺ 光纤激光器上。但因该类激光器输出能量较低, 且高浓度的掺 Er³⁺ 系统存在能量上转换和自脉动等缺陷, 因而大大限制了其广泛应用^[5,6]。一种好的解决方法是在掺 Er³⁺ 光纤中共掺杂 Yb³⁺。Yb³⁺ 具有宽的吸收带宽和大的峰值吸收截面, 使得 Er/Yb 共掺光纤比掺 Er³⁺ 光纤的泵浦吸收功率可高出 2 个数量级, 同时可有效抑制因 Er³⁺ 掺杂浓度过高引起的自脉动现象, 提高激光器输出的稳定性^[7]。目前, 在国内外都已逐步开展了对 Er/Yb 共掺光纤激光器的研究工作^[8-10]。

本文报道了一种工作在 L 波段波长可调谐的 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器。利用 Er/Yb 共掺光纤在常规波段的放大自发辐射 (ASE) 对其中未泵浦的一段 Er/Yb 共掺光纤进行泵浦, 将其增益谱的位置移到 L 波段; 同时利用由两段高双折射光纤及两个偏振控制器组成的光纤环镜作为滤波器件, 获得了波长可调谐的激光输出。这种激光器结构简单, 输出激光稳定, 可作为对 L 波段放大器和其他光器件的测试光源。

1 实验装置及工作原理

L 波段线形腔结构 Er/Yb 共掺双包层光纤激光

器的实验装置如图 1。其谐振腔由两个光纤环形镜组成, 环镜 1 仅由一 3 dB 耦合器构成, 相当于一个宽带高反射镜。环镜 2 由一 3 dB 耦合器、长度分别为 5 cm 和 9 cm 的两段在 1310 nm 波长处拍长为 1.8 mm 的高双折射光纤 (HiBi fiber) 以及两个偏振控制器 (PC1 和 PC2) 组成, 作为腔内滤波器。腔内的增益介质为一 9 m 长的 Er/Yb 共掺单模双包层光纤 (EYDF), 其内包层具有梅花状结构, 数值孔径为 0.43, 平均直径为 125 μm 。其中 Er³⁺ 在 1535 nm 处的峰值吸收系数为 39 dB/m, Yb³⁺ 在 915 nm 处的峰值吸收系数为 389 dB/m。为了产生高功率的激光输出, 该 EYDF 与一个锥形光纤 Bundle (TFB) 相连。实验中采用工作在 976 nm 处的 5 个多模 LD 泵源同时泵浦 TFB 中的 5 根多模输入光纤, TFB 两侧的单模光纤分别作为激光信号的输入、输出端。通过调节环镜 2 中的 PC1 和 PC2, 可调节环镜 2 的滤波特性, 使某些波长的光在腔内达到阈值条件, 形成激光振荡, 并通过环镜 2 的输出端输出。

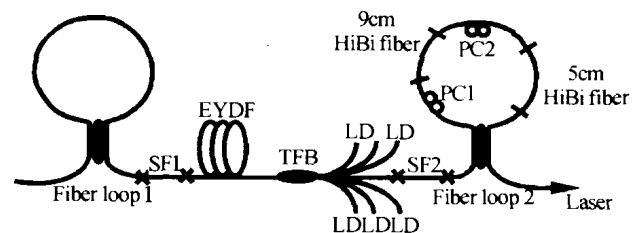


图 1 L 波段线形腔 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of linear cavity Er/Yb co-doped double-clad fiber laser

1.1 环形镜的调谐原理

为方便起见, 先讨论由一段高双折射光纤及一个偏振控制器组成的光纤环镜的调谐原理。入射到环镜的光经 3 dB 耦合器出射后, 分为功率相等但沿环路分别为顺时针和逆时针传输的两束光, 每束光在经过一段高双折射光纤后可分解为沿光纤快轴 (定义为 x 轴) 和慢轴 (定义为 y 轴) 两个互相垂直

*国家重点基金 (No. 60137010)、国家自然科学基金 (No. 69977012)、天津市自然科学基金 (No. 99380101)、天津攻关项目 (No. 03183611) 资助
Tel: 022-23509856 Email: dfj010074@phys.nankai.edu.cn
收稿日期: 2004-03-09

方向的分量光,它们之间存在 $\Delta\varphi = 2\pi BL/\lambda$ 的相位差,其中 B 为光纤的双折射系数, L 为高双折射光纤的长度, λ 为波长. 当这两束光在经过 PC 时,PC 使其电矢量方向旋转角度为 θ . 当沿顺、逆时针传播的光重新在 3 dB 耦合器处相遇时,满足相干条件的沿 x 、 y 轴的两束光分别发生干涉. 因此,最终环境的输出特性是由 x 分量的光和 y 分量的光分别相干后再叠加的结果决定的. 其光的透射率为

$$T = \sin^2 \theta [1 - \frac{1}{2}(1 + \cos \Delta\varphi(\lambda))]$$

从上式可以看出,环境的透射率是波长 λ 的周期函数,因此环境具有梳状滤波器的作用. 另外,通过调整夹角 θ ,可以改变 T 的大小,即改变干涉条纹的对比度,这样可以在谐振腔中加强所需的激光跃迁,抑制不需要的跃迁而获得波长可调谐的激光输出.

用两段高双折射光纤和两个偏振控制器组成环形镜时,沿环境顺时针和逆时针传输的光均可分解为 2^2 束分量光,它们之间形成 4 对相干光,环境的输出特性由这 4 个分光束干涉结果的叠加来决定. 当只有一段高双折射光纤和一个偏振控制器时,环境的透射率是余弦函数的形式,当有两段高双折射光纤和两个偏振控制器交替连接时,其透射率函数应该是两个余弦形式函数的叠加效果. 因此,光纤环境的反射光强度跟位相差和偏振控制器的状态有关,通过适当选择两段高双折射光纤的长度及调整两个偏振控制器状态可以改变光纤环境反射峰的位置和对比度,因而可能得到形状跟 EYDF 增益谱互补的环境反射谱,从而可以实现在一定波长调谐范围内激光输出功率的平坦化.

1.2 L 波段的工作原理

由于实验中采用的 EYDF 较长,且掺杂浓度较大,故前一段 EYDF 即可将泵浦光完全吸收,使该光纤中剩余一段作为未泵浦部分. 这样,泵浦光对前段 EYDF 进行泵浦产生的常规波段的放大自发辐射可作为二次泵源,再对未泵浦的那段 EYDF 进行泵浦,可使其增益谱位置移到 L 波段^[1]. 实验中采用总长为 9 m 的 EYDF,实现了 Er/Yb 共掺光纤激光器在 L 波段的稳定运转.

2 实验结果及分析

图 2(a) 为通过调整环境中 PC1 和 PC2 的状态而得到的波长范围在 1588.6 nm ~ 1622.6 nm 的不同波长处的激光光谱图. 从图中可以看出,该激光器的波长调谐范围达 34 nm,信噪比在 30 dB 以上,对应的激光线宽窄于 0.2 nm. 通过功率计观测激光器的输出功率特性,测得在整个波长调谐范围内,最

大激光输出功率均超过 200 mW,而功率的起伏小于 ± 0.2 dB. 图 3 为在波长 $\lambda = 1613.4$ nm 处,两次扫描间隔为 1 min 共 14 次扫描所得到的输出激光光谱图,从图中可以看出,输出激光的稳定性很好.

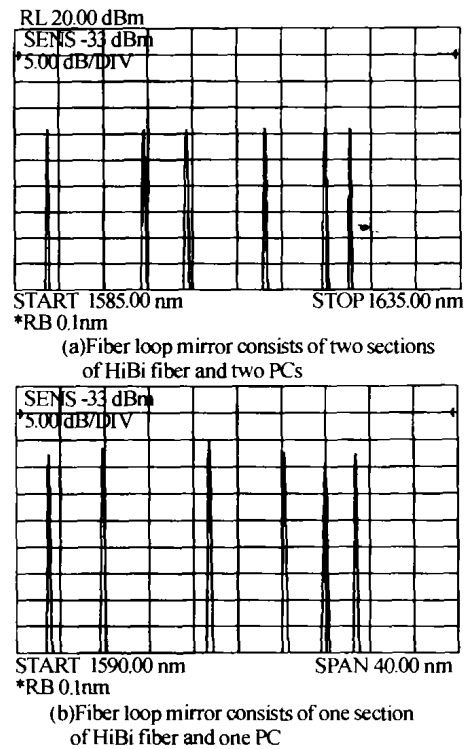


图 2 激光器输出的不同波长处的激光光谱图
Fig. 2 Output optical spectra of fiber laser operating in different wavelength

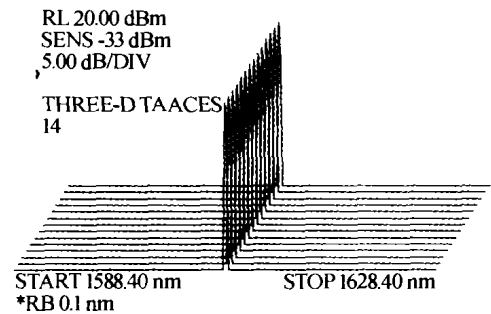


图 3 激光输出的稳定性谱图(14 次重复扫描)
Fig. 3 The stability of output laser (14 times repeated scans)

为了研究输出激光特性与光纤环境滤波特性之间的关系,在其他实验条件不变的情况下,改变光纤环境为只含有一段长 9 cm 的高双折射光纤和一个偏振控制器. 图 2(b) 为改变环境中偏振控制器的状态而得到的不同波长处的输出激光光谱图. 从图中可以看出,对应的调谐范围约 28 nm,输出激光功率起伏约 ± 2 dB. 图 2(a) 与图 2(b) 比较,说明输出激光的性质与环境的滤波特性有很大的关系. 采用由两段高双折射光纤和两个偏振控制器构成的光纤环境作为滤波器,可得到调谐范围较大、不同波长处功率起伏很小的激光输出. 由更多段高双折射光纤和偏振控制器所组成的光纤环境可以调整出更好的滤波特性,能够获得调谐范围更宽、功率更平坦的激

光输出. 但由于高双折射光纤和普通单模光纤之间焊接损耗非常大, 环境内高双折射光纤数目太多, 会使激光器腔内损耗很大, 严重影响输出激光的功率; 并且会使整个激光器变得更加复杂, 影响激光输出的稳定性. 所以实际使用上一般就采用由两段高双折射光纤和两个偏振控制器组成光纤环镜的结构.

3 结论

由两个光纤环镜构成线形腔结构, 实现了 L 波段可调谐的 Er/Yb 共掺光纤激光器的稳定运转. 该激光器结构简单, 稳定性好, 输出功率较高, 激光波长在 34 nm 范围内可调, 是比较理想的 L 波段放大器和其他光器件的测试光源. 同时, 与掺 Er^{3+} 光纤激光器相比, 这种光纤激光器可进一步提高输出激光的功率和稳定性, 有望代替半导体激光器成为光通信系统的光源.

参考文献

- 1 Lee J, Ryu U, Ahn S J, *et al.* Enhancement of power conversion efficiency for an L-band EDFA with secondary pumping effect in the unpumped EDF section. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(1): 42 ~ 45
- 2 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. of OFC'2001*, paper WA6
- 3 Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Meng Hongyun, *et al.* Wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser operating in L-band. *Opt Quantum Electron*, 2003, **35**(1): 69 ~ 73
- 4 郭小东, 乔学光, 贾振安, 等. 一种高功率掺铒光纤超荧光光源. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1298 ~ 1300
Guo X D, Qiao X G, Jia Z A, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1298 ~ 1300
- 5 强则焯, 张徐亮, 沈林放, 等. L-Band 掺铒光纤放大器的优化设计. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1470 ~ 1473
Qiang Z X, Zhang X L, Shen L F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1470 ~ 1473
- 6 Sanchez F, Boudec P Ie, Francois P L, *et al.* Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers. *Phys Rev A*, 1993, **48**: 2220 ~ 2229
- 7 Ding M, Cheo P K. Effects of Yb:Er co-doping on suppressing self-pulse in Er-doped fiber laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, **9**(3): 324 ~ 326
- 8 Hofer M, Fermann M E, Goldberg L, *et al.* High-power side-pumped passively mode-locked Er-Yb fiber laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(9): 1247 ~ 1249
- 9 Johan Nilsson, Shaif-Ul Alam, Jose A. *et al.* High-power and tunable operation of Erbium-Ytterbium co-doped cladding-pumped fiber laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(8): 987 ~ 994
- 10 王屹山, 郑瑶雷, 沈华, 等. 包层泵浦的铒镱共掺光纤激光高效产生的实验研究. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1025 ~ 1027
Wang Y S, Zheng Y L, Shen H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1025 ~ 1027

Tunable Linear Cavity Er/Yb Co-doped Double-clad Fiber Laser Operating in L- band

Dong Fajie, Zhang Shumin, Lu Fuyun, Wang Hongjie

Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

Received date: 2004-03-09

Abstract A tunable linear cavity Er/Yb co-doped double-clad fiber laser operating in L-band, which utilizes amplified spontaneous emission (ASE) as a secondary pump source, is presented. The output wavelength can be tuned over 34 nm with power excursion of 0.4 dB by using a high birefringence fiber loop mirror as a wavelength filter. With 5 LDs side-pumping Er/Yb co-doped fiber simultaneously, an output power of 200 mW is achieved and the stability of output laser is very good.

Keywords L-band; linear cavity; tunable; Er/Yb co-doped double-clad fiber

Dong Fajie was born in 1979, in Shandong Province. He graduated from School of Physics, Nankai University and received the B. S. degree in 2001. His research mainly includes technology of fiber laser and amplifier.

