

文章编号: 0258-7025(2005)04-0449-04

L 波段可调谐 Er/Yb 共掺环形腔光纤激光器

张书敏^{1,2}, 董法杰¹, 吕福云¹, 王宏杰¹

(¹南开大学物理科学学院, 天津 300071
²河北师范大学物理学院, 河北 石家庄 050016)

摘要 报道了一种工作在 L 波段波长可调的环形腔 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器。利用两段高双折射光纤和两个偏振控制器组成的环形镜作波长选择器件,通过调整环形镜中偏振控制器的状态来改变环形镜对不同波长的反射率以实现某波长的激光输出,使波长调节范围达到 60 nm,不同波长处激光输出功率的起伏小于 0.7 dB;采用较长的 Er/Yb 共掺双包层光纤(EYDF)作增益介质,利用 6 个 976 nm 激光二极管同时抽运前段 Er/Yb 共掺双包层光纤所产生的放大自发辐射谱作为二次抽运源,对腔内未被抽运的一段 Er/Yb 共掺双包层光纤进行抽运,使增益谱移到 L 波段,实现了 L 波段可调谐激光器的稳定输出。在最大抽运功率为 3594.5 mW 时,测得抽运入纤功率为 2737.37 mW,得到最大输出功率 300 mW,斜率效率为 11% 的激光输出,所形成激光光谱的 3 dB 带宽为 1.8 nm,边模抑制比大于 38 dB。

关键词 激光技术; 可调谐激光器; Er/Yb 共掺双包层光纤; 环形腔; L 波段

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Wavelength Tunable Ring Er³⁺/Yb³⁺ Co-doped Fiber Laser Operating in L-band

ZHANG Shu-min^{1,2}, DONG Fa-jie¹, LU Fu-yun¹, WANG Hong-jie¹

(¹ Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 30007, China
² Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050016, China)

Abstract A novel Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber ring laser, which utilizes amplified spontaneous emission (ASE) as a secondary pump source so that it can operate in L-band, is demonstrated. Using a high-birefringence fiber loop mirror (HiBi-FLM) as the wavelength filter, which contains two-section high-birefringence fiber and two polarization controllers (PC), and by setting the polarization controllers properly, the reflection spectrum of the loop mirror can be adjusted to let the laser operate in only one mode, and the output wavelength can be tuned in a wide range of 60 nm, from 1559.2 nm to 1619.4 nm. The stability of the laser is very good, and the output power of the laser at different wavelengths can also be flattened within 0.7 dB. Under the maximum pump power of 3594.5 mW, the absorbed pump power by the fiber is measured to be 2737.37 mW and the maximum output power obtained is 300 mW, the slope efficiency is 11%. The laser emits a line with a 3-dB band width of 0.18 nm, and the side mode suppression ratio is greater than 38 dB.

Key words laser technique; wavelength tunable laser; double-clad Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber; ring cavity; L-band

1 引 言

随着密集波分复用光通信系统对逐渐增长的传输能力要求的提高,将传统的 C 波段传输窗口扩展

到 L 波段已引起了许多人的关注。自 1990 年 Massicott 首次提出 L 波段光纤放大器以来,L 波段放大器的研究倍受青睐^[1,2]。与此同时,可用作 L

收稿日期: 2004-03-08; 收到修改稿日期: 2004-09-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60137010, 90101022, 69977012), 河北省教育厅科研计划课题(2001241)和天津市科技攻关项目(03183611)资助项目。

作者简介: 张书敏(1965—),女,河北晋州人,河北师范大学副教授,博士研究生,主要从事非线性导波光学、光纤激光器方面的研究。E-mail: zhangsm_sd@eyou.com

波段通信用光源和放大器测试源的光纤激光器近年来也成为人们研究的热点^[3,4]。因掺铒光纤激光器工作在光通信窗口,故多数研究仅限于 L 波段掺铒光纤激光器上^[5,6]。但因该类激光器输出能量较低,大大限制了其广泛应用。一种好的解决方法是在掺 Er^{3+} 光纤中共掺杂 Yb^{3+} 。这样一方面可抑制因 Er^{3+} 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];另一方面利用 Yb^{3+} 离子具有很大的峰值吸收截面,提高了激光器的输出能量^[8~10]。

本文报道了一种工作在 L 波段、波长可调的、环形腔 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器(EYDF),具有结构简单、光源可调谐等特点,在光谱学、光传感、光物质特性及波分复用通信系统中得到广泛应用。

2 实验装置及原理

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,环形腔主要由一 9 m 长的 Er/Yb 共掺双包层光纤,偏振无关光隔离器(PI-ISO),偏振控制器 PC1 和一个滤波器组成。隔离器的作用是使光在环形腔内单向传输,避免了两个不同方向的光在腔内传输时形成的模式竞争。腔内偏振控制器 PC1 的作用是用于控制光的偏振态。滤波器由一 3 dB 耦合器,长度为 5 cm 和 9 cm 的两段在 1550 nm 波长处拍长为 633 nm 的高双折射光纤(HiBi fiber)和两个偏振控制器 PC2 和 PC3 组成,起到波长选择的作用。所选用的 Er/Yb 共掺双包层光纤纤芯的数值孔径为 0.15,芯径为 $5.5 \mu\text{m}$,梅花型内包层的直径为 $130 \mu\text{m}$, Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的掺杂浓度分别为 $4.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 和 $6 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 。该 Er/Yb 共掺双包层光纤与一个拉锥光纤束(TFB)相连,拉锥光纤束由 6 根独立的多模光纤和 1 根单模光纤组成,为了产生高功率的激光输出,采用 976 nm 处

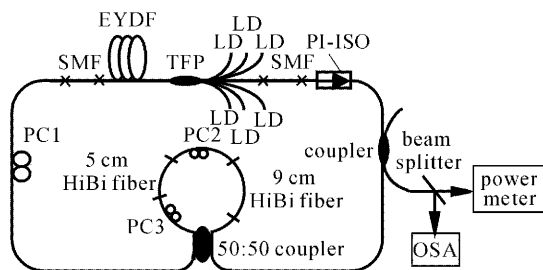


图 1 L-波段环形腔光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of L-band $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber ring laser

的 6 个多模激光二极管同时抽运拉锥光纤束的 6 根多模输入光纤(多模光纤的数值孔径均为 0.22)。拉锥光纤束及 Er/Yb 共掺双包层光纤两侧的单模光纤分别与偏振无关光隔离器和 PC1 相连,构成一具有封闭式波导结构的环形光纤激光器。形成的激光经由一个 80:20 输出耦合器的 20% 端输出,通过一分束镜后采用 MS9001B1 型光谱分析仪观测输出激光的光谱特性,同时用 LP-3A 型功率计监测其功率。

2.2 Er/Yb 共掺光纤 L 波段的工作原理

文献[2]首次提出利用有害的后向放大自发辐射谱(ASE)作为二次抽运源对另一段铒光纤进行抽运,不仅可提高能量转换效率及激光器的信噪比,还可将掺铒光纤在 C 波段的增益谱转移到 L 波段。尽管本实验中采用的 Er/Yb 共掺双包层光纤的结构与掺铒光纤不同,但因 Er/Yb 共掺双包层光纤的激光跃迁同样发生在 Er^{3+} 离子上,所以也可实现其增益谱向长波的转移。依据上述原理,当在谐振腔内利用 6 个 976 nm 的激光二极管对 Er/Yb 共掺双包层光纤进行抽运时,由于 Er/Yb 共掺双包层光纤掺杂浓度较高,加之所选用的光纤长度较长,因而光纤存在一段未抽运的光纤,利用 Er/Yb 共掺双包层光纤在常规波段的放大自发辐射谱对该段未抽运的 Er/Yb 共掺双包层光纤进行二次抽运,就可将 Er/Yb 共掺双包层光纤增益谱的位置移到 L 波段。需要说明的是,尽管对于工作在 L 波段的放大器来说,所要求的 Er/Yb 共掺双包层光纤的长度较长,但对于构成谐振腔的激光器来说,由于光在腔内形成振荡,所以仅采用 9 m 长的 Er/Yb 共掺双包层光纤即可使其在 L 波段稳定工作。

2.3 环形镜滤波器的波长选择原理

由一段高双折射光纤和一个偏振控制器组成的环境可作为一梳状滤波器。入射到环形镜的光经过 3 dB 耦合器后被分为功率相等、分别沿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电矢量沿光纤快轴和慢轴两互相垂直的分量光,它们之间存在一固定的相位差 $\Delta\varphi = 2\pi\Delta nL/\lambda$,其中 $\Delta n = n_o - n_e$, n_o 和 n_e 分别为双折射光纤快轴和慢轴的折射率, L 为高双折射光纤的长度, λ 为波长。若将高双折射光纤的快轴定义为 x 轴,慢轴定义为 y 轴,并假定调制偏振控制器的状态到正好将通过它的光沿电矢量方向旋转 90° ,则在环境中沿顺时针方向传输的光的 x 分量先沿高双折射光纤的快轴传输,经偏振控制器旋转 90° 后

再进入 3 dB 耦合器时方向改变为 y 方向;同理,在环境中沿逆时针方向传输的 x 分量先经过偏振控制器旋转 90° 变为 y 方向,再沿高双折射光纤的慢轴传输后进入 3 dB 耦合器。这两束光之间存在 $\Delta\varphi$ 的相位差,可在耦合器处发生干涉。同样,相对传输的两束光之间的 y 分量再次在耦合器中相遇时也因有 $\Delta\varphi$ 的相位差而发生干涉。因此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后决定的。环境的透射率可表示为

$$T = 0.5\{1 - [1 + \cos\Delta\varphi(\lambda)]/2\}。 \quad (1)$$

从(1)式可以看出,环境的作用相当于一梳状滤波器。若偏振控制器的状态不是恰好将光沿电矢量方向旋转 90° ,则只有部分光能在耦合器中发生干涉,因而会使最终干涉条纹的对比度降低。实验中,通过选择高双折射光纤的长度和调整偏振控制器的状态,可使某一波长的光透射率最低,进而在腔内形成激光振荡,达到波长选择的目的。

当采用两段高双折射光纤和两个偏振控制器组成的环境作为一滤波器时,入射到环形镜的光经过 3 dB 耦合器后被分为功率相等、分别沿顺时针和逆时针传输的两束光。每束光在经过两段高双折射光纤时,被分解成 2^2 束光,这些光在环境中传输一周后再次在耦合器处相遇时,方向相同的两束分量光之间因有相位差而发生干涉,因而环境的输出特性可以看作是由这 2^2 个干涉结果的叠加。

实验表明^[11],通过调整偏振控制器 PC2 和 PC3 的状态,不仅可以在不改变环形镜透射峰波长位置的情况下调整透射峰的深度,还可以在不改变其形状的情况下,移动透射波长的位置。这样,通过调整 PC2 和 PC3 的状态,环形镜即起到了一梳状滤波器的作用。

实验中,通过合理选择环形镜的各个参数,可在调谐范围内只有一个反射峰,调节 PC2 和 PC3 的状态会引起这个反射峰位置的改变(调整偏振控制器状态时,用光谱仪进行监测,达到调谐目的)。即利用光纤环境的双折射和波长特性,可以在谐振腔内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。

需要说明的是,由两个偏振控制器和两段高双折射光纤组成的环境所形成的透射光谱不具有对称性。即当偏振控制器处于某种状态时,某一波长处的透射率较大,同时存在另一透射率较小的波长^[12]。这样,就可通过调整偏振控制器的状态,使环境对 Er/Yb 共掺双包层光纤增益谱上较大增益

处波长的反射率较小,而使较小增益处波长的反射率较高,因而可使光在环形腔中传输时获得的增益较平坦。相应地,使在调谐范围内,不同波长处输出激光的光能量相差较小,提高了激光器的性能。

3 实验结果和分析

图 2 为选用输出耦合比为 80:20 的耦合器输出时,通过调整环形腔内 PC1 的状态及环境中 PC2 和 PC3 的状态而得到的不同波长处激光输出的光谱图。通过调整 PC2 和 PC3 的状态,可使激光器的输出波长在 1559.2~1619.4 nm 范围内可调。其调节范围宽达 60 nm,通过调整 PC1 的状态,可使激光器输出稳定。不同波长处激光的输出功率都大于 3.7 dBm,最大可达 4.4 dBm。由于采用了两个偏振控制器和两段高双折射光纤组成的环境作滤波器,因而不同波长处激光输出的功率起伏小于 0.7 dB。3 dB 带宽为 0.18 nm,即激光光谱的 3 dB 带宽较宽,这是因为环境中光纤长度较短,环境的反射带宽较宽^[13]。如果增加环境内光纤的长度,有利于窄线宽激光器的形成。但如果光纤太长,环境所构成的梳状滤波器的各个反射峰之间的间距变小,有可能在 Er/Yb 增益谱范围内存在多个反射峰,这是会有几个波长的激光同时满足起振条件而在腔内形成激烈竞争,使激光器输出稳定性受到影响。从图 2 还可以看出,光信噪比均超过 38 dB(实验中将光谱仪纵坐标的参考值调到 10 dB,即将整体光谱图下移到不显示较小的噪声)。

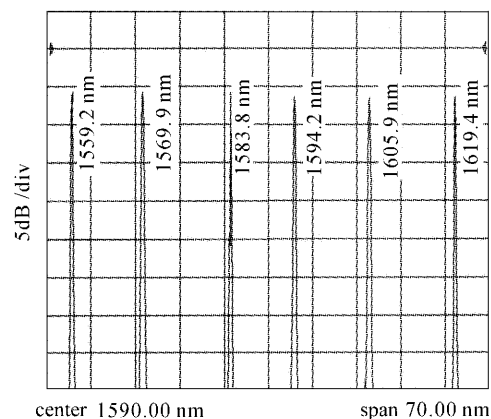


图 2 激光器输出的不同波长的激光光谱图

Fig. 2 Output optical spectra of fiber laser operating at different wavelength

图 3 为在波长 1594.2 nm 处两次扫描间隔为 1 min,共 14 次扫描的激光光谱图。从图 3 中可以

看出,输出激光的稳定性很好。

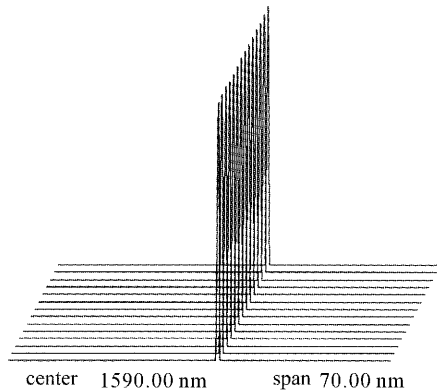


图 3 扫描间隔为 1 min,共 14 次扫描的激光光谱图
Fig. 3 14 times repeated scans spectra of output laser with 1 min interval

图 4 给出了激光器的输出功率随抽运入纤功率的变化曲线。激光器的阈值为 118.53 mW,在最大抽运功率为 3594.5 mW 时,实验测得抽运入纤功率为 2737.37 mW,相应的最大输出功率为 300 mW,斜率效率为 11.1%。

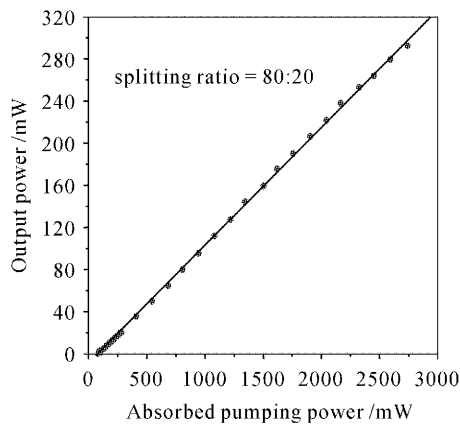


图 4 激光器输出特性曲线
Fig. 4 Output power of the laser as a function of absorbed pump power

4 结 论

利用较长的 Er/Yb 共掺双包层光纤作增益介质,采用多个 LD 同时对该光纤进行包层抽运,实现了具有较高输出功率和较大斜率效率的 L 波段 Er/Yb 共掺光纤激光器的稳定运转。采用由两段高双折射光纤和两个偏振控制器组成的环镜作波长选择器件,该激光器波长在 60 nm 波长范围内可调,

且不同波长处激光输出功率的起伏小于 0.7 dB。采用该类激光器有望进一步提高掺铒光纤激光器的性能,从而代替半导体激光器成为光通信系统的主要光源。

参 考 文 献

- 1 A. Buxens, H. N. Poulsen, A. T. Clausen *et al.*. Gain flattened L-band EDFA based on upgraded C-band EPFA using forward ASE pumping in an EDF section[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(9): 821~823
- 2 Juhan Lee, Uh-Chan Ryu, Seong Joon Ahn *et al.*. Enhancement of power conversion efficiency for an L-band EDFA with a secondary pumping effect in the unpumped EDF section [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 42~45
- 3 Qinghe Mao, John W. Y. Lit. Optical bistability in an L-band dual-wavelength erbium-doped fiber laser with overlapping cavities[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9): 1252~1254
- 4 Qinghe Mao, John W. Y. Lit. L-band fiber laser with wide tuning range based on dual-wavelength optical bistability in linear overlapping grating cavities [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(10): 1252~1258
- 5 Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Meng Hongyun *et al.*. Wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser operating in L-band[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 677~679
杨石泉,赵春柳,蒙红云等.工作在 L 波段的可调谐环形腔掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 677~679
- 6 Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Yuan Shuzhong *et al.*. Wavelength tunable linear cavity erbium-doped fiber laser operating in L-band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 706~708
杨石泉,赵春柳,袁树忠等. L 波段线性腔波长可调谐掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 706~708
- 7 Ming Ding, Peter K. Cheo. Effects of Yb:Er-codoping on suppressing self-pulsing in Er-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 324~326
- 8 Johan Nilsson, Shaif-UI Alam, Jose A. Alvarez-Chavez *et al.*. High-power and tunable operation of erbium-ytterbium co-doped cladding-pumped fiber lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(8): 987~994
- 9 Xiang Wanghua, Zhang Liang, Pei Xin *et al.*. Er³⁺-Yb³⁺ co-doped ring cavity fiber lasers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(10): 1015~1017
向望华,张 良,裴 新等. Er³⁺-Yb³⁺ 共掺杂环形腔光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(10): 1015~1017
- 10 Pei Xin, Xiang Wanghua, Tan Li *et al.*. Effect of Yb:Er codoping on suppressing self-pulsing in Er-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 94~98
裴 新,向望华,谭 莉等. Yb:Er 共掺杂对掺铒光纤激光器中自脉冲行为的抑制作用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 94~98
- 11 Shenping Li, K. S. Chiang, W. A. Gambling. Dynamic gain flattening of an erbium-doped fiber amplifier using a high-birefringence fiber loop mirror[C]. *OFC*, 2001. TuA5-1
- 12 Shenping Li, K. S. Chiang, W. A. Gambling. Gain flattening of an erbium-doped fiber amplifier using a high-birefringence fiber loop mirror[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9): 942~944
- 13 Xiaojun Fang, Richard O. Claus. Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2146~2148