

文章编号: 0258-7025(2004)10-1161-04

全光纤型 Er/Yb 共掺光纤短腔激光器

王天枢, 郭玉彬*, 李军, 孙雅东, 白冰, 李晓滨, 胡贵军

(吉林大学通信工程学院光通信系, 吉林 长春 130012)

摘要 报道了一种高输出功率、高斜率效率的短腔 Er/Yb 共掺杂光纤激光器。激光谐振腔由一段 Er/Yb 共掺杂单模光纤与一对布拉格反射波长相同的光纤布拉格光栅(FBG)组成。反射率为 60% 的光纤光栅用作光纤激光器谐振腔的输出, 3 dB 带宽为 0.16 nm。反射率为 99% 的光纤光栅作为高宽带反射腔镜, 同时作为抽运光输入端, 3 dB 带宽 1.02 nm。以 980 nm 激光二极管(LD)作抽运源进行实验。使用不同的抽运功率分别测量不同长度的 Er/Yb 共掺杂光纤, 优化光纤激光器谐振腔得到的最佳长度仅为 13 cm。即选用 13 cm Er/Yb 共掺杂光纤作为增益介质来制作短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器, 最大输出功率可达 11 mW, 输出功率稳定性 ± 0.01 dB, 抽运阈值功率为 35 mW, 斜率效率为 15.3%, 测量其 1552.2 nm 激光的输出光谱, 25 dB 线宽为 0.3 nm, 边模抑制比 > 60 dB, 波长稳定性为 0.05 nm。可用于密集波分复用(DWDM)系统。

关键词 光电子学; 光纤激光器; Er/Yb 共掺光纤; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

All-Fiber Type Short Cavity Er/Yb Co-Doped Fiber Laser

WANG Tian-shu, GUO Yu-bin, LI Jun,

SUN Ya-dong, BAI Bing, LI Xiao-bin, HU Gui-jun

(Department of Optical Communications, College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract A short cavity Er/Yb co-doped fiber laser of high output power and high slope efficiency is demonstrated. Its resonant cavity is composed of a section of single mode Er/Yb co-doped fiber and two fiber Bragg gratings with the same reflection wavelength. A fiber grating is used for output of resonant cavity with 60% reflectivity. Its 3 dB-bandwidth is measured as 0.16 nm. The other fiber grating is used for high broadband reflector and input of pump light with 99% reflectivity. Its 3 dB-bandwidth is measured as 1.02 nm. This fiber laser is pumped by a 980 nm semiconductor laser. Meanwhile, the Er/Yb co-doped fiber with different lengths is measured by different pump power, and the optimized length of the fiber is only 13 cm. A short cavity fiber grating laser is done by using 13 cm Er/Yb co-doped fiber as gain medium. Its maximum output power is 11 mW and its power stability is better than ± 0.01 dB. The laser has a threshold of 35 mW and a slope efficiency of 15.3%. Its 1552.2 nm output spectral 25 dB-bandwidth is measured as 0.3 nm. Edge-mode suppression ratio > 60 dB has been achieved and its wavelength stability is 0.05 nm. This fiber laser is able to be used for dense-wavelength-division-multiplex (DWDM) system.

Key words optoelectronics; fiber laser; erbium/ytterbium co-doped fiber; fiber Bragg grating

1 引言

掺铒光纤具有很高的增益和抽运效率, 其增益

谱很宽, 且能在光通信的第三窗口 $1.55 \mu\text{m}$ 波段工作, 从而引起人们的关注, 被认为是未来长距离大容量的超高速光纤通信系统的理想光源^[1,2]。随着紫

收稿日期: 2003-05-23; 收到修改稿日期: 2003-09-22

基金项目: 信息产业部信息产业科研计划(2003XK220002)资助项目。

作者简介: 王天枢(1976—), 男, 吉林长春人, 吉林大学通信工程学院硕士研究生, 主要从事全光通信器件的研究。

E-mail: tianshuw@163.com

* 通信联系人。E-mail: guoyb@email.jlu.edu.cn

外光写入光纤光栅技术的日趋成熟,短腔掺铒光纤光栅激光器成为光纤激光器领域研究的热点。

目前发展成熟的掺 Er^{3+} 光纤激光器可以提供较好的输出信号,并具有很宽的调谐范围。然而国内外报道的采用高掺 Er^{3+} 光纤激光器均不足以在短光纤上提供足够的抽运吸收,使得激光器斜率效率低于 1%,最高输出限制在 $-20 \sim -10$ dBm 范围^[3,4]。为提高输出功率,往往需要级联一级光纤放大器,即主振荡功率放大器(MOPA)结构^[2,5,6]。另外高掺杂光纤中会产生杂质离子聚集效应, Er^{3+} 浓度达到一定水平时,会起到饱和吸收作用而引起自脉冲,为此只能提高抽运功率来饱和离子对抽运发射的吸收。在掺 Er^{3+} 光纤中共掺 Yb^{3+} 是一个有效的办法。 Yb^{3+} 具有较大的峰值吸收截面(800~1100 nm),可以提供更高的增益,使 Er^{3+} 浓度保持在较低水平,同时 Er/Yb 光纤中 Er 离子的低掺杂抑制了激光器的自脉冲效应,这将大大提高激光器的效率和输出功率的稳定性,可以在无需放大和反馈的条件下实现高功率高效率输出^[7]。该激光器为全光纤线路结构,有利于与全光通信系统兼容,将在一维光子集成激光器和新一代密集波分复用系统(DWDM)动态全光通信网络中有广泛的应用前景^[8,9]。

2 Er/Yb 光纤激光器设计原理

图 1 为系统能级图和能量转移过程。抽运光并不直接激发粒子到 Er^{3+} 上能级, Yb^{3+} 掺入与 Er^{3+} 形成 $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 离子对,而 Yb^{3+} 离子起着吸收 800~1100 nm 附近的抽运光作用。当抽运光射入时,基态 Yb^{3+} 吸收大部分抽运光后激发到上能级 ${}^2F_{5/2}$ 。相邻的 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 之间的交叉弛豫使能量通过 $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 离子对迅速转移给 Er^{3+} 离子,使 Er^{3+} 从基态 ${}^4I_{15/2}$ 跃迁到激发态 ${}^4I_{11/2}$ 。以实现 1550 nm 区域光放大的作用。

Yb^{3+} 离子在 1000 nm 附近具有较大的峰值吸收截面,可以吸收 980~1060 nm 抽运光,因而光纤对抽运光的吸收能力较单掺 Er^{3+} 的光纤提高了两个数量级。又因为 Yb^{3+} 为二能级系统,保证 Yb^{3+} 之间不会发生能量上转换。 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 能级系统之间的相对失配量不会超过 0.5%,所以 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量转移效率很高。

单个 Er^{3+} 离子基态 ${}^4I_{15/2}$ 和激发态 ${}^4I_{13/2}$ 粒子数密度分别为 N_1, N_2 。 Er^{3+} 对 3 个态上的粒子数密度

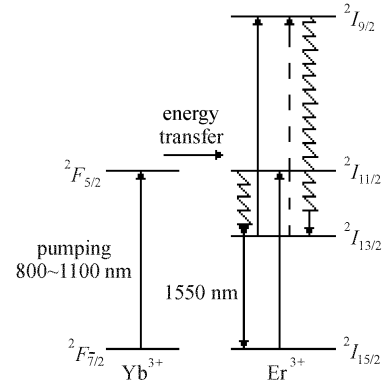


图 1 Er/Yb 系统能级图

Fig. 1 Energy level diagram of the Er/Yb system

分别为 N_{11}, N_{12}, N_{22} ,总密度 N_0 中离子对部分比例 x ,并有 $N_1 + N_2 = (1 - 2x)N_0, N_{11} + N_{12} + N_{22} = xN_0$ 。 Yb^{3+} 的基态和受激发后上能级的粒子数密度分别为 M_1 和 M_2 ,并且 $M_1 + M_2 = M_0, M_0$ 为总密度。 Er/Yb 光纤能量转移和激光动态行为的速率方程为^[10]

$$\frac{dM_2}{dt} = \Lambda_P^{\text{Yb}}(M_0 - 2M_2) - \rho M_2 N_0 \times [(1 - 2x)(1 - n_2) + x(1 - n_{22})] - \frac{M_2}{\tau_{\text{Yb}}} \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = (\Lambda_P^{\text{Er}} + \rho M_2)(1 - n_2) - qr_q [(\chi + 1)n_2 - 1] - \frac{n_2}{\tau_2} \quad (2)$$

$$\frac{dn_{11}}{dt} = -(\Lambda_P^{\text{Er}} + \rho M_2)n_{11} + qr_q [\chi - (\chi + 1)n_{11} - \chi n_{22}] + \frac{1 - n_{11} - n_{22}}{\tau_2} \quad (3)$$

$$\frac{dn_{22}}{dt} = (\Lambda_P^{\text{Er}} + \rho M_2)(1 - n_{11} - n_{22}) - qr_q [n_{11} + (\chi + 1)n_{22} - 1] - \frac{n_{22}}{\tau_{22}} \quad (4)$$

$$\frac{dq}{dt} = qr_q N_0 \{ (1 - 2x)[(\chi + 1)n_2 - 1] + \alpha x (\chi - 1 - \chi n_{11} + n_{22}) \} - \frac{q}{\tau_c} \quad (5)$$

其中, c 为光速; n 为光纤折射率; $q(t)$ 为激光腔内光子密度; $\Lambda_P^{\text{Yb}} = \frac{P_P}{h\nu_P A_{\text{eff}}} \sigma^{\text{Yb}}$ 和 $\Lambda_P^{\text{Er}} = \frac{P_P}{h\nu_P A_{\text{eff}}} \sigma^{\text{P}}$ 为抽运效率, τ_c 为激光腔内光子寿命, P_P 为抽运光功率; $n_i = N_i / (1 - 2x)N_0 (i = 1, 2); n_{ij} = N_{ij} / xN_0 (ij = 11, 12, 22); A_{\text{eff}}$ 为有效模场面积, $h\nu_P$ 为抽运光子能量; $r_q = \frac{c}{n} \sigma_a; \sigma_P, \sigma_a$ 分别为 Er^{3+} 在抽运和激励波长

处的吸收截面^[11]; $\chi = \sigma_e/\sigma_a$ 为 Er^{3+} 在发射波长处的发射和吸收截面之比; τ_i 对应各个激发态的寿命; ρ 为从 Yb 到 Er 的能量转移概率系数。

3 实验结果及分析

短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器的结构如图 2 所示,一对布拉格波长相同的光纤光栅熔接在一段 Er/Yb 光纤两端构成激光谐振腔,用反射率 60% 的光纤光栅 1 作 980 nm 波长抽运激光输入,反射率 99% 的光纤光栅 2 作反射镜。选择发射放大自发辐射(ASE)谱的 GXF001 型掺铒光纤放大器(EDFA)

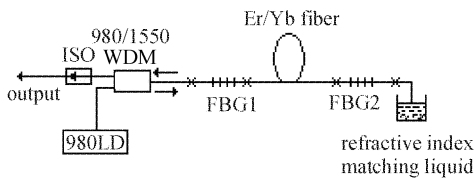


图 2 短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器结构图
Fig. 2 Schematic configuration of the short cavity Er/Yb fiber grating laser

作宽带光源测量两只光纤光栅的反射光谱。放大自发辐射谱的波长范围为 1530~1560 nm,饱和输出功率 >15 dBm,掺铒光纤放大器的输入光功率范围为 -4~+7 dBm,光功率输出稳定度 <±0.1 dB,噪声系数 <6(当掺铒光纤放大器的 $P_{in} = 0$ dBm, $P_{out} = 16$ dBm,输入波长 1550 nm 时),增益平坦度为 ±0.5 dB/nm ($P_{in} = 0$ dBm),当抽运功率为 40 mW 时,输出光功率为 4.95 mW。使用 Anritsu MS9710B 光谱分析仪(工作范围 600~1750 nm)观测光纤布拉格光栅(FBG)反射谱特性,分辨率 0.1 nm。FBG1,FBG2 的反射谱如图 3(a),(b)所示,其布拉格反射峰值波长 1552 nm。为提高 1552 nm 激光输出的功率并避免强 980 nm 抽运对光纤器件的损伤,图 2 系统的实验采用反向抽运方式,由一个 1550 nm 光隔离器从 980/1550 波分复用(WDM)的 1550 nm 信号端输出,激光谐振腔低反射输出与 980/1550 波分复用的公共端熔接在一起。为防止回波,高反射光栅端尾纤插入匹配液中。抽运光经过光纤光栅耦合进 Er/Yb 光纤,在光纤中被 Yb^{3+} 离子吸收, Yb^{3+} 起敏化作用将能量迅速转移给相邻的 Er^{3+} ,使 Er^{3+} 在光纤中形成粒子数反转而产生激光。再经过窄带光纤光栅的选频得到所需波长(1552.2 nm)的激光输出。

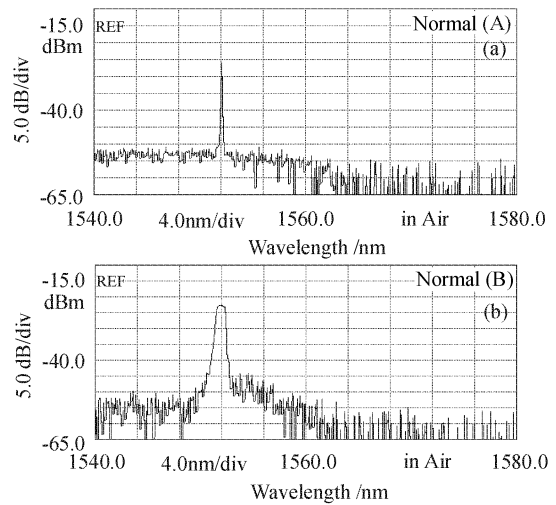


图 3 光纤布拉格光栅的反射谱
Fig. 3 Reflection spectrum of the FBG
(a) FBG1; (b) FBG2

实验选用 Er/Yb 共掺光纤,截止波长 1162 nm,工作在单模状态,数值孔径为 0.14;对信号光和抽运光的吸收系数分别为 29 dB/m(1535 nm)和 227 dB/m(974 nm),背景损耗为 125 dB/km(1550 nm)。抽运源用 Multiplex Inc. 的 MTX9P 980 nm 高功率抽运激光器,中心工作波长为 974.5 nm,半宽度为 2.4 nm,阈值电流为 39 mA,量子效率 $\eta = 0.596$ W/A,抽运源最大驱动电流为 296.0 mA,尾纤的最大抽运功率为 152.9 mW。采用 Anritsu MS9710B 光谱分析仪,分辨率 0.07 nm,并采用 NOYES OPM4 光功率计(测量范围 25~-50 dBm)。密集波分复用系统中要求信噪比越高越好,选用光纤型隔离器加在光纤激光器输出端,防止光纤端面反射对其性能造成影响,其隔离度 >50 dB,回波损耗 >60 dB,插入损耗为 0.31 dB,带宽 >60 nm。

首先确定了在 980 nm LD 抽运下的 Er/Yb 共掺光纤光栅激光器 Er/Yb 光纤的最佳长度,如图 4 所示,使用 45 mW,55 mW,65 mW 的抽运功率分别对不同长度的 Er/Yb 光纤进行实验,可确定光纤的最佳长度约为 13 cm,即选 13 cm 的 Er/Yb 光纤进行实验。

实验中使用的抽运源最大输入电流为 240.0 mA,抽运功率为 106.9 mW。图 5 为 Er/Yb 光纤光栅激光器功率输出特性曲线。其中抽运光功率为进入 980/1550 nm 波分复用前的功率,由曲线可得到激光器抽运功率阈值为 35 mW,输出激光功率相

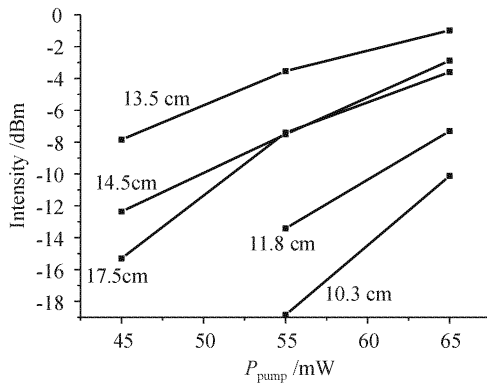


图 4 不同长度 Er/Yb 光纤下激光器输出强度随抽运功率的变化关系

Fig. 4 Output intensity of the laser with the pump power for different length of Er/Yb fibers

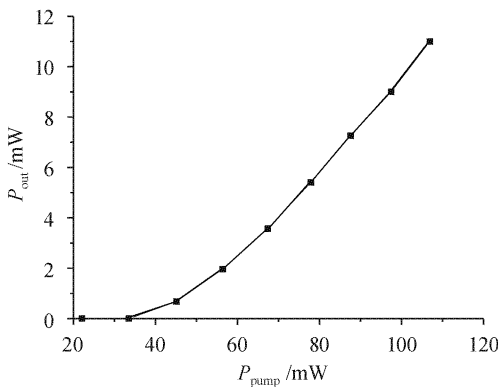


图 5 Er/Yb 光纤光栅激光器功率输出特性

Fig. 5 Output power of the Er/Yb fiber grating laser as a function of absorbed pump power

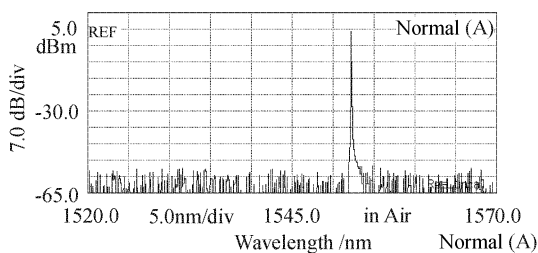


图 6 Er/Yb 光纤光栅激光器输出激光谱

Fig. 6 Output spectrum of the Er/Yb doped fiber grating laser

对于有效抽运光功率的斜率效率约为 15.3%。图 6 为 Er/Yb 光纤光栅激光器的输出光谱。中心波长为 1552.2 nm (带宽 0.2 nm, 25 dB 带宽 0.3 nm), 边模抑制比 > 60 dB。考验 1 h 以上, 其光源谱线中心波长不漂移, 波长精度 < 0.05 nm, 且重复性好。抽运源偏流 240 mA, 输出光功率高达 11 mW。由于采用电源抽运稳流, 选用隔离器、滤波器及波分复

用以减小线路中的反射、回波及连接损耗噪声等, 输出功率稳定性为 ± 0.01 dB。抽运阈值较高的原因主要是由于对标准通信光纤与 Er/Yb 光纤的熔接损耗较大使激光谐振腔内损耗过大 (腔内熔接损耗高达 0.11 dB)。如果对 Er/Yb 光纤载氢敏化, 把一对光纤光栅直接刻在 Er/Yb 光纤上, 可大大减小激光谐振腔内损耗, 从而减小 Er/Yb 光纤光栅激光器的抽运阈值功率并提高斜率效率。

4 结 论

仅使用 13 cm Er/Yb 光纤和两个光纤布拉格光栅联接组成激光器的激光谐振腔, 设计并建立了一种短腔 Er/Yb 单模光纤光栅激光器。给出了功率输出特性, 阈值抽运光功率为 35 mW, 最大输出光功率为 11 mW, 斜率效率为 15.3%。测量了其 1552.2 nm 激光的输出光谱 (带宽 0.2 nm), 边模抑制比 > 60 dB, 波长精度 < 0.05 nm, 输出功率稳定性为 ± 0.01 dB。

参 考 文 献

- 1 T. Komukai, M. Nakazawa. Tunable single frequency erbium doped fiber ring lasers using fiber grating etalons [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(Part 2, 6A):679~680
- 2 G. A. Ball, W. W. Morey. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23):1979~1981
- 3 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6):420~422
- 4 J. L. Zyskine, V. Mizrahi, D. J. DiGiovanni *et al.*. Short single frequency erbium-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15):1385~1387
- 5 Victor Mizrahi, David J. DiGiovanni, Robert M. Atkins *et al.*. Stable single-mode erbium fiber grating laser for digital communication [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12):2021~2025
- 6 G. A. Ball, C. E. Holton, G. Hull-Allen *et al.*. 60 mW 1.5 μ m single-frequency low-noise fiber laser MOPA [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2):192~194
- 7 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
- 8 Jia Baohua, Sheng Qiuqin, Chen Kai *et al.*. A practical wavelength continuously tunable fiber laser with high-powered and low-noised [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):133~136
贾宝华, 盛秋琴, 陈凯等. 一种实用化的高功率低噪声波长连续可调光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(2):133~136
- 9 Jun Li, Yubin Guo, Tianshu Wang *et al.*. An all-fiber type Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9):503~505
- 10 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
- 11 J. E. Townsend, W. L. Barnes, K. P. Jedrzejewski *et al.*. Yb³⁺ sensitised Er³⁺ doped silica optical fibre with ultrahigh transfer efficiency and gain [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(21):1958~1959