

自调 Q、自锁模铒/镱共掺光纤激光器*

谢春霞 吕福云** 张书敏 王健 王宏杰 董孝义

(南开大学物理学院光电信息科学系, 天津 300071)

摘要 研究了结构新颖的环形腔铒/镱(Er/Yb)共掺双层光纤激光器. 为了获得高功率激光输出, 使用 6 个激光二极管(LD)同时抽运 Er/Yb 共掺光纤, 采用光纤光栅(FBG) Sagnac 环作为波长选择器, 得到了中心波长为 1548.11 nm、谱线宽度为 0.06 nm 的窄线宽激光输出; 并利用增益光纤作为可饱和吸收体, 实现了自调 Q、自锁模脉冲输出. 当抽运功率为 719 mW 时, 激光器输出自调 Q 脉冲, 脉冲周期为 20 μ s, 脉冲宽度为 2.8 μ s, 脉冲的平均功率为 38.4 mW, 峰值功率为 274.3 mW; 当抽运功率为 3.6 W 时, 激光器输出自锁模脉冲, 脉冲宽度为 4ns, 平均功率为 319 mW, 脉冲峰值功率大于 10 W, 重复频率为 7.937 MHz.

关键词 激光物理; Er/Yb 共掺光纤激光器; 自调 Q; 自锁模; 可饱和吸收体; 光纤光栅

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

0 引言

二极管抽运掺稀土离子的短脉冲光纤激光器在光传感、激光测距、光通讯等领域有广泛的应用. 掺铒(Er)光纤激光器与放大器由于其运转波长与光通讯的第 3 窗口(1.55 μ m)相一致, 得到了广泛的研究^[1,2]. 但高浓度的掺 Er 光纤存在能量上转换和自脉动等缺陷, 限制了掺 Er 光纤的增益系数^[3]. 在掺 Er 光纤中共掺杂镱(Yb)离子是一种解决方法, 不但可以提供从 800 nm 到 1100 nm 的宽带吸收^[4], 为抽运光源的选择上提供很大的灵活性, 同时提高了抽运速率和抽运效率, 抑制离子对导致的自脉动效应. 因此, Er/Yb 共掺光纤有源器件引起了人们的极大兴趣, 调 Q、锁模 Er/Yb 共掺光纤激光器成为研究热点^[5,6]. 在国内, 占生宝等人对双包层 Er/Yb 共掺光纤激光器动态特性进行了分析^[7]; 夏江珍等人对 Er/Yb 共掺光纤激光器的弛豫振荡特性进行了理论和实验的研究^[8]; 但关于自调 Q、自锁模 Er/Yb 共掺光纤激光器的文章尚未见报道.

本文介绍了一种结构新颖的全光纤自调 Q、自锁模 Er/Yb 共掺光纤激光器. 使用 6 个 976 nm 的激光二极管(LD)同时抽运 Er/Yb 共掺光纤, 利用光纤光栅(FBG) Sagnac 环作为波长选择器和相位稳定器, 并利用未被抽运的增益光纤作为可饱和吸收体, 在不同的抽运功率下, 分别得到了自调 Q、自锁模的脉冲输出. 由于在激光器的谐振腔内没有任

何主动器件, 减少了腔内损耗和不稳定性, 因而具有更大的优势.

1 实验装置

1.1 光纤光栅 Sagnac 环的原理

光纤光栅 Sagnac 环由一个 3dB 耦合器和一只 FBG 构成, 其结构如图 1 虚线内部分. 假设信号光

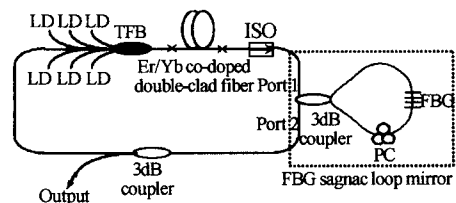


图 1 实验装置

Fig. 1 The experimental setup

从端口 1 入射, 由 3 dB 耦合器分配到环的两臂的光, 功率相等, 相位差为 $\pi/2$. 在 FBG 反射带宽外的信号光直接通过 FBG, 这时光纤光栅 Sagnac 环相当于一个 Sagnac 环形镜, 信号光全部从端口 1 反射输出. 而在 FBG 反射带宽内的信号光会被 FBG 反射回去, 再在 3 dB 耦合器中形成干涉输出, 干涉的结果决定于环的臂长差, 此时, 光纤光栅 Sagnac 环相当于一个光栅 Michelson 干涉仪^[9], 从端口 2 输出的信号光的透射率可以表示为^[10]

$$T = \{ [(1-2x) \sqrt{1-\delta^2/\kappa^2} + 2 \sqrt{x(1-x)} \cdot \sinh(\sqrt{\kappa^2-\delta^2} L_g) \cos(\beta \Delta L)]^2 / [\cosh^2(\sqrt{\kappa^2-\delta^2} L_g) - \delta^2/\kappa^2] \} \quad (1)$$

式中 x 为耦合器的耦合率, δ 为光栅的失谐量, κ 为光栅耦合系数, L_g 为光栅长度, β 为模式传输常量. $\Delta L = L_1 - L_2$ 为光纤光栅 Sagnac 环两臂的臂长差. 如果光栅是横向均匀的 Bragg 光栅, 则 $\kappa = 2\pi\delta n/\lambda$,

* 天津市科技攻关项目(No. 033183611)、国家自然科学基金重点项目(No. 60137010)、国家高技术研究发展计划(863)(No. 2003AA312100)和开放实验室(2003-19)资助项目

** Tel: 022-23509856 Email: lufy@nankai.edu.cn

收稿日期: 2005-01-06

$\delta = \beta - \pi/\Lambda$, Λ 为光栅周期.

由于使用的是 3 dB 耦合器, $x = 0.5$, 则式(1)可以简化为

$$T = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L_g)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L_g) - \delta^2/\kappa^2} \cos^2(\beta \Delta L) \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 当 $\Delta L = 0$ 时, 在 FBG 反射带宽内的光全部由端口 2 透射输出, 光纤光栅 Sagnac 环的透射谱与 FBG 的反射谱相同^[11], 因此, 光纤光栅 Sagnac 环是一个很好的波长选择器; 当 $\Delta L \neq 0$ 时, 端口 2 输出的光具有梳状光谱分布, 输出光谱的峰值间距 $\Delta\lambda$ 由 ΔL 决定

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_e \Delta L} \quad (3)$$

1.2 实验装置

自调 Q、自锁模 Er/Yb 共掺环形腔光纤激光器的实验装置见 1. Er/Yb 共掺光纤的一端与带有 6 根多模光纤和 1 根单模光纤构成的锥形光纤束 (TFB) 抽运耦合器相连接. 由于 Yb 在 975.5 nm 的波长处有很强的吸收峰, 为了获得高功率的信号光输出, 实验中把 6 根 976 nm 多模 LD 输出尾纤与 TFB 中的 6 根多模光纤熔接, 同时抽运 Er/Yb 共掺光纤, 多模光纤纤芯直径为 105 μm , 数值孔径为 0.15, 内包层的直径为 125 μm , 数值孔径为 0.22, 对 920 nm 抽运光的耦合效率为 94%. Er/Yb 共掺单模光纤的长度为 9 m, 截止波长为 1240 nm; 纤芯直径为 5.5 μm , 数值孔径为 0.15; 内包层为梅花型结构, 平均直径为 125 μm , 数值孔径为 0.45; 其中 Er 在 1535 nm 处的峰值吸收为 39 dB/m, Yb 在 915 nm 处的峰值吸收为 389 dB/m. 在 Er/Yb 共掺光纤和光纤光栅 Sagnac 环之间熔接一个隔离器 (ISO), 保证信号光在环形腔中单向运行, 并抑制了光纤中受激布里渊散射的影响. FBG 位于光纤光栅 Sagnac 环的中心, 在其反射带宽内的光全部从端口 2 输出, FBG 的中心波长为 1548.1 nm, 3 dB 带宽为 0.1 nm, 反射率为 99.9%. 偏振控制器 (PC) 用来改变信号光的偏振状态. 信号光通过 3 dB 耦合器的一个端口输出. 整个光纤激光器的环形腔长约为 25 m.

在实验中, 使用带宽 2 GHz 的 PIN 硅快速光电探测器和带宽 500 MHz 的示波器 (HP54616B) 观测激光器的时域特性, 并通过激光打印机打印输出; 同时使用 LP-3A 型功率计监测其功率, 用 MS9001B1 型光谱分析仪观测输出激光的光谱特性.

2 结果及分析

由于光纤光栅 Sagnac 环的透射谱主要由环的臂长差决定, 在实验中使 FBG 位于光纤光栅

Sagnac 环的中心, 即 $\Delta L = 0$, 从端口 1 入射的在 FBG 反射带宽内的信号光将全部从端口 2 透射输出. 仔细调节 PC, 使光纤光栅 Sagnac 环的透射率达到最大. 实验中从端口 2 测得的光纤光栅 Sagnac 环的透射谱如图 2, 透射峰的中心波长与 FBG 的中心波长一致, 透射率大于 22 dB. Er/Yb 共掺光纤激光器的输出光谱如图 3, 其中心波长为 1548.11 nm, 谱线宽度为 0.06 nm, 边模抑制比大于 50 dB.

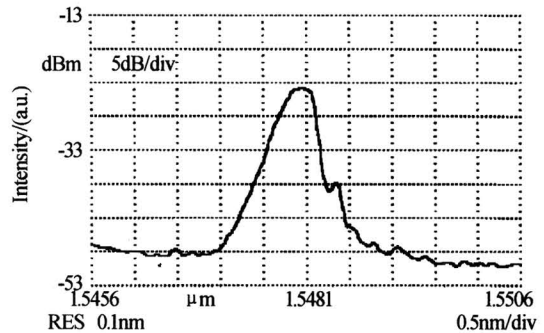


图 2 光纤光栅 Sagnac 环的透射谱

Fig. 2 The transmission spectrum measured at port 2

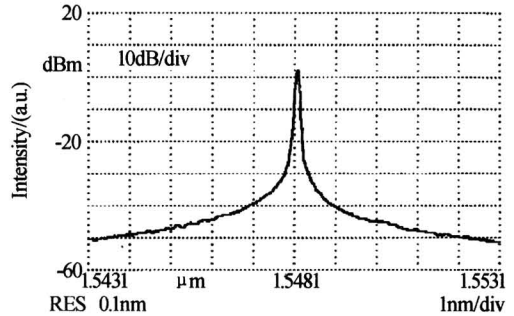


图 3 激光器的输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of the laser

同时使用 6 个 LD 连续抽运 Er/Yb 共掺光纤, 测得的 Er/Yb 共掺光纤激光器的输出功率随抽运光总功率变化的关系曲线如图 4. 从图 4 可以看出, 激光器的阈值功率为 130 mW, 当抽运光功率为 3.6 W 时激光器的最大输出功率达到 319 mW. 连续观察 4 个小时, 激光器的功率抖动率小于 2%.

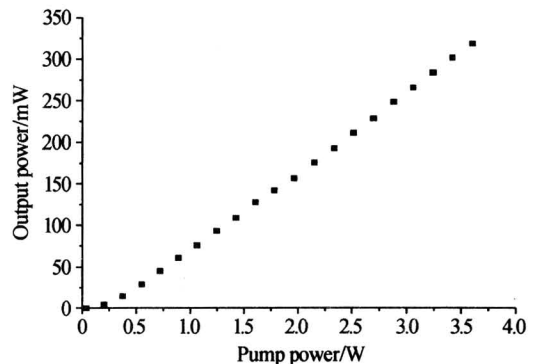


图 4 输出功率随抽运功率变化关系曲线

Fig. 4 Output power versus pump power

同时,实验中进一步研究了抽运光功率对 Er/Yb 共掺光纤激光器时域特性的影响. 当抽运功率略大于阈值功率(130 mW)时,激光器输出微秒量级的自调 Q 脉冲序列. 这是由于采用的 Er/Yb 共掺双包层光纤很长,在较低的抽运功率下,未被抽运的光纤起到了可饱和吸收体的作用^[12]. 实验还发现调 Q 脉冲周期和持续时间都随抽运功率的增加而减小. 调 Q 脉冲周期随抽运功率变化的关系曲线如图 5,当抽运功率为 719 mW 时,调 Q 脉冲的周期达到最小值为 20 μ s. 实验中发现当抽运功率为 130 mW~650 mW 时,每一个调 Q 脉冲包络内都包

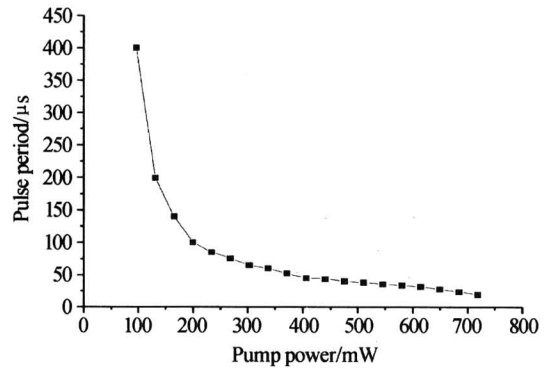


图 5 脉冲周期随抽运功率变化曲线
Fig. 5 Pulse period versus pump power

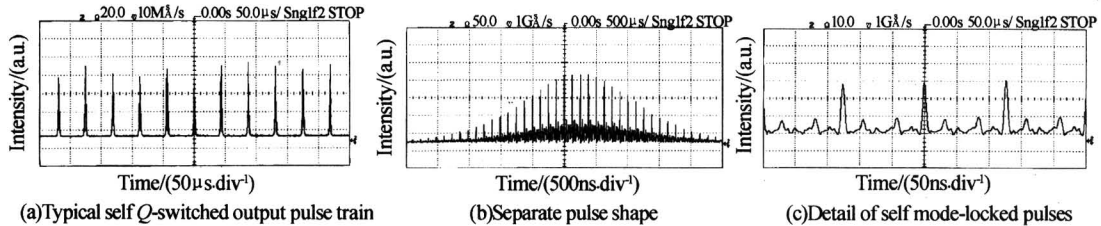


图 6 激光器的时域特性($P_p = 440$ mW)

Fig. 6 Output character of laser for a pump power of 400mW

含了许多纳秒量级的脉冲. 激光器输出的典型的自调 Q 脉冲序列如图 6(a),调 Q 脉冲周期为 44 μ s,此时抽运功率为 440 mW;图 6(b)是单个自调 Q 脉冲的展开图,可以看出调 Q 脉冲是准高斯型的,并且调 Q 脉冲包络内部分裂出许多纳秒量级的脉冲;图 6(c)为单个调 Q 脉冲的进一步展开图,调 Q 脉冲包络内部分裂出的脉冲的周期为 126 ns,脉冲宽度为 4 ns. 激光器谐振腔内光子寿命 τ 可以表示为

$$\tau = nL/c \quad (4)$$

式中 n 是光纤的折射率系数, L 是环形腔的长度, c 是真空中光速. 实验中激光器的环形腔长约为 25 m,腔内光子寿命与调 Q 脉冲包络内部分裂脉冲的周期一致,并且分裂脉冲的重复频率和脉冲宽度不随抽运功率的增加而变化. 因此,自调 Q 脉冲包络内的分裂脉冲是由自锁模引起的. 在一些主动调 Q 光纤激光器中也出现过自锁模^[13,14],但在这种环形腔结构的 Er/Yb 共掺光纤激光器中观测到自调 Q、自锁模的文章还尚未见报道.

当抽运功率为 650 mW~719 mW 时,自调 Q 脉冲包络内的自锁模脉冲消失. 随着抽运功率的增加,调 Q 脉冲的重复频率迅速增加,但脉冲的峰值功率减小. 图 7 是抽运功率为 719 mW 时稳定的自调 Q 脉冲输出图,脉冲的平均功率为 38.4 mW,峰值功率为 274.3 mW,脉冲宽度为 2.8 μ s,单脉冲能量为 0.77 μ J,重复频率为 50 kHz.

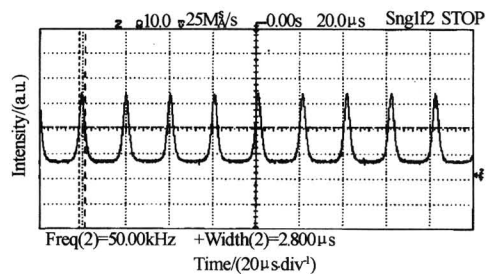


图 7 稳定的自调 Q 脉冲输出($P_p = 719$ mW)
Fig. 7 Stable self Q-switched output pulse train for a pump power of 719mW

当抽运功率略大于 719 mW 时,自调 Q 脉冲突然消失,只有自锁模脉冲输出. 锁模脉冲的重复频率和脉冲宽度不随抽运功率的增加而变化,但脉冲的峰值功率随着抽运光功率的增加而加大. 图 8 是抽运功率为 3.6 W 时激光器输出的典型自锁模脉冲图,脉冲宽度为 4 ns,重复频率为 7.937 MHz,平

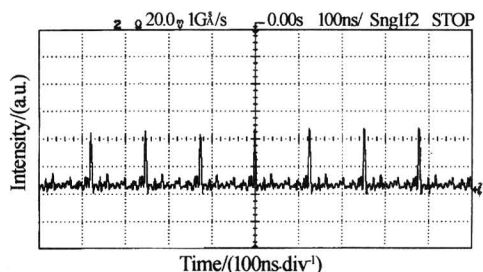


图 8 典型的自锁模脉冲输出($P_p = 3.6$ W)
Fig. 8 Typical self mode-locked output pulse train for a pump power of 3.6W

均功率为 319 mW, 锁模脉冲的峰值功率大于 10 W.

3 结论

对结构新颖的全光纤环形腔 Er/Yb 共掺光纤激光器进行了实验研究. 利用光纤光栅 Sagnac 环作为波长选择器, 利用未被抽运的增益光纤作为可饱和吸收体, 得到了高功率、窄线宽、稳定的脉冲输出. 激光器的中心波长为 1548.11 nm, 谱线宽度为 0.06 nm, 边模抑制比大于 50 dB. 当抽运功率为 719 mW 时, 激光器输出的自调 Q 脉冲的峰值功率为 274.3 mW, 脉冲宽度为 2.8 μ s, 重复频率为 50 kHz. 当抽运功率为 3.6 W 时, 输出的自锁模脉冲宽度为 4 ns, 平均功率为 319 mW, 脉冲峰值功率大于 10 W, 重复频率为 7.937 MHz.

参考文献

- 1 郑瑶雷, 赵卫, 王贤华, 等. 掺 Er³⁺ 飞秒光纤放大器的特性研究. 光子学报, 2004, **33**(3): 268~271
Zheng Y L, Zhao W, Wang X H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 268~271
- 2 王肇颖, 王永强, 林冉, 等. 宽可调谐自起振被动锁模掺铒光纤激光器. 光子学报, 2004, **33**(8): 905~907
Wang Z Y, Wang Y Q, Lin R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 905~907
- 3 Mysliski P, Nguyen D, Chrostowski J. Effects of concentration on the performance erbium-doped fiber amplifiers. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(1): 112~120
- 4 Karasek M. Optimum design of Er³⁺ Yb³⁺ codoped fibers or large-signal high-pump-power applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(10): 1699~1705
- 5 Laroche M, Chardon A M, Nilsson J, et al. Compact diode-pumped passively Q-switched tunable Er-Yb double-clad fiber laser. *Optics Letters*, 2002, **27**(22): 1980~1982
- 6 Bonadeo N H, Knox W H, Roth J M, et al. Passive harmonic mode-locked soliton fiber laser stabilized by an optically pumped saturable Bragg reflector. *Optics Letters*, 2000, **25**(19): 1421~1423
- 7 占生宝, 赵尚弘, 董淑福, 等. 双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器动态特性的分析. 光子学报, 2004, **33**(4): 409~411
Zhan S B, Zhao S H, Dong S F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 409~411
- 8 夏江珍, 瞿荣辉, 蔡海文, 等. 共掺光纤激光器弛豫振荡特性研究. 中国激光, 2004, **31**(7): 807~810
Xia J, Qu R H, Cai H W, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(7): 807~810
- 9 Kashyap R. A new class of fibre grating based band-pass filters: the asymmetric interferometer. *Opt Comm*, 1998, **153**(1): 14~18
- 10 Shu X W, Jiang S, Huang D X. Fiber grating Sagnac loop and its multiwavelength-laser application. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(8): 980~982
- 11 Erdogan T, Member, IEEE. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 12 Marcuse D. Pulsing behavior of a three-level laser with saturable absorber. *IEEE J Quant Electron*, 1993, **29**(8): 2390~2396
- 13 Lee G P, Newson T P. Diode pumped high power simultaneously Q-switched and self mode-locked erbium doped fiber laser. *Electron Lett*, 1996, **32**(4): 332~333
- 14 Myslinski P, Chrostowski J, Koningstein J A, et al. Self-mode locking in a Q switched erbium-doped fiber laser. *Appl Opt*, 1993, **32**(3): 286~290

Self-Q-switched and Self-mode-locked Erbium/Ytterbium Co-doped Fiber Laser

Xie Chunxia, Lu Fuyun, Zhang Shumin, Wang Jian, Wang Hongjie, Dong Xiaoyi

Department of Optical-Electronic Information Science, Institute of Physics, Nankai University, Tianjin, 300071

Received date: 2005-01-06

Abstract A novel narrow line-width Erbium/Ytterbium (Er/Yb) co-doped double-clad fiber ring laser has been reported. To obtain higher output power, the laser is pumped by six Continuous Wave Laser Diodes (LD) operating at 976 nm through six pigtailed of a Tapered Fiber Bundle connected with the Er/Yb co-doped fiber. By using fiber Bragg grating (FBG) Sagnac loop mirror as a wavelength-selective device, the cladding-pumped fiber laser oscillation with a line-width of 0.06 nm and central wavelength of 1548.11 nm has been obtained. By using the saturable absorption of an un-pumped Er/Yb co-doped double-clad fiber, with different pump power, such laser can operate at different modes. The self-Q-switched pulse with pulse width of 2.8 μs , period of 20 μs and average power of 38.4 mW can be achieved at the pump power of 719 mW. And the peak power of the Self-Q-switching pulse is 274.3 mW. When the pump power is 3.6 W, the maximum peak power of the self-mode-locked pulse reaches 10 W with a repetition rate of 7.937 MHz and duration of 4 ns. As no active element is inside the cavity, this fiber ring laser potentially has many advantages over conventional pulsed fiber laser systems.

Keywords Laser physics; Er/Yb co-doped fiber laser; Self-Q-switching; Self-mode-locking; Saturable absorber; FBG



Xie Chunxia was born in Tianjin in 1980. She is a graduate student of the Department of Optical-Electronic Information Science, Institute of Physics, Nankai University and engaged in fiber laser technology, ultrashort optical pulses and optical communications.