

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0052-04

# 单纵模光纤激光器及其高速传输性能

王天枢 钱 胜 周雪芳 祁永敏 李齐良

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 设计了一种基于光纤饱和吸收效应的环形单纵模光纤激光器结构,以可调谐光纤布拉格光栅作为波长选择器件,与 2 m 未抽运掺铒光纤一起位于环形腔反射臂上。采用 980 nm 激光二极管注入环形腔抽运高掺铒光纤形成激光增益,在饱和吸收体中形成驻波干涉,实现 1550 nm 波段单纵模激光输出,可调谐范围达 42 nm。饱和吸收体对激光的吸收系数随抽运光强的增加而减小,形成了输出激光的光学双稳态特性。为了提高单纵模激光的稳定性、抑制跳模产生的噪声,采用一只抽运源通过光纤分路器分光,同时抽运光纤激光器和光纤放大器,实现了 24 mW 稳定的单纵模激光输出,功率稳定性优于  $\pm 0.005$  dB,工作效率可达 18.5%。以 12.5 Gb/s 高速码率调制,传输 42 km 无误码,在未来大容量通信领域具有潜在应用价值。

**关键词** 激光器;单纵模光纤激光器;饱和吸收;光纤布拉格光栅

中图分类号 TN248.1; TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0052

## Single-Longitudinal Mode Fiber Laser and the High Speed Transmission

Wang Tianshu Qian Sheng Zhou Xuefang Qi Yongmin Li Qiliang

(College of Communications Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** A single-longitudinal mode fiber laser with fiber saturable absorber is designed. Tunable fiber Bragg grating as the wavelength selector is in the ring cavity with a 2 m-long unpumped erbium-doped fiber. A section of high concentration erbium-doped fiber is pumped by a 980 nm laser diode and the standing-wave interference is produced in the saturable absorber. Single-longitudinal mode laser at 1.55  $\mu\text{m}$  band is observed and the output range is 42 nm. The optical bistable is observed because the absorption for laser reduces with the increasing of the pump power. Only one laser simultaneously pumps fiber amplifier and laser through a splitter for enhancing stability and decreasing noise. The output power exceeds 24 mW and the stability is less than  $\pm 0.005$  dB. The laser slope efficiency is 18.5%. A 12.5 Gb/s codes rate is used in the fiber laser transmission experiment. The signal is transmitted in 42 km without regeneration. This fiber laser has potential applications in the field of the high capacity communications.

**Key words** lasers; single-longitudinal mode fiber laser; saturable absorber; fiber Bragg gratings

## 1 引言

单纵模窄线宽掺铒光纤激光器在密集波分复用系统(DWDM)和长距离光纤传感领域具有广阔的应用前景<sup>[1~5]</sup>,是固体激光技术实用化的最佳选择<sup>[6,7]</sup>。光纤布拉格光栅(FBG)以其窄反射带宽、宽波长调谐范围和极低的插入损耗,成为光纤激光器最理想的波长调谐器件<sup>[8,9]</sup>。

本文设计了一种环形腔波长可调谐掺铒光纤激光器,利用谐振腔内的一段掺铒光纤作为饱和吸收体,形成驻波干涉从而实现激光工作在单纵模状态<sup>[10]</sup>。为了抑制跳模,采用一只 980 nm 激光二极

管(LD)经分路器同时抽运光纤激光器和光纤放大器,低功率、模式稳定的激光输出后,再进入放大器提高输出功率,从而获得了模式稳定的单纵模激光,功率可达 24 mW。饱和吸收效应对激光的非线性吸收表现出光学双稳态特性,分析了双稳态特性的原理。以光纤激光器为载波源,采用 12.5 Gb/s 高速码率调制,可无误码传输 42 km。

## 2 单纵模光纤激光器结构

具有饱和吸收体的单纵模光纤激光器的抽运光经 980/1550 nm 波分复用器(WDM)耦合进一段高

基金项目:浙江省科技计划(2008C31010)资助项目。

作者简介:王天枢(1975—),男,讲师,博士,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: tianshuw@hdu.edu.cn

掺铒光纤(EDF)构成激光增益结构,作为饱和吸收体的低掺铒光纤 EDF2 位于光纤环形器端口 2,后接可调谐 FBG 作为窄带反射式波长选择结构。随着抽运功率增加抑制了自发辐射,经过 FBG 选择特定波长而谐振产生激光。EDF 对激光的吸收饱和效应形成驻波干涉,腔内偏振控制器能够抑制偏振模的影响,得到这个谐振腔的适当偏振态,在激光器中控制偏振态使振荡光束在光纤饱和吸收体处发生干涉,使某一纵模的光干涉最强,从而使饱和吸收体吸收饱和,形成空间烧孔效应。由于这一波长的光吸收最少,有利于抑制其他纵模振荡,实现单模窄线宽运转。

但是,激光纵模跳变将引起高强度的噪声,从而影响激光器的调制效果。当抽运功率较小时,阈值以上较小的范围内,纵模可保持长时间稳定而不跳模。但较小的激光功率给长距离通信的实现带来困难。为此,设计了带有光纤放大器(EDFA)的可调谐单纵模掺铒光纤激光器结构。如图 1 所示,980 nm抽运光经光纤分路器分光,抽运光分别进入光纤激光器和光纤放大器。在抽运功率达到 130 mW时,激光器抽运光 45 mW,使激光仅仅位于阈值之上工作,模式稳定、无跳模现象、噪声低。85 mW的抽运光经 WDM2 进入光纤放大器,激光器产生的激光经一只隔离器进入放大器的输入端,较小的激光功率可以被放大。

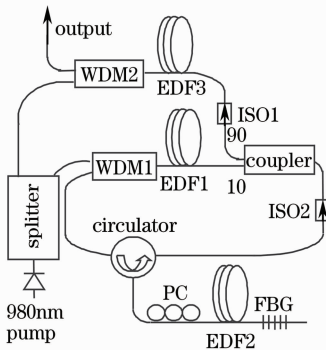


图 1 可调谐单纵模环形光纤激光器结构图

Fig. 1 Configurations of single longitudinal-mode ring erbium-doped fiber laser

作为增益光纤的 EDF 的数值孔径为 0.22,对 1531 nm 峰值吸收为 24 dB/m。作为饱和吸收体的低浓度 EDF 数值孔径为 0.24,对 1531 nm 峰值吸收为 16.7 dB/m,对 1550 nm 信号波长的吸收为 8.86 dB/m,长度为 2 m。选择耦合器的输出分光比 90%,附加损耗 0.02 dB。经光隔离器(ISO1)输

出以防止光纤端面反射,其隔离度 $>50$  dB,插入损耗 0.38 dB。反向抽运可以防止抽运光进入吸收体,导致不能形成有效的驻波干涉。因为激光器的开环增益很大,反向传输的光会引起放大,甚至引起拍频振荡,对模式有很大影响。ISO2 用来抑制噪声,环形器可保证激光在环形腔中的单向运转,提高激光模式稳定性,其端口隔离度均大于 52 dB,插入损耗小于 1.5 dB。

FBG 光滤波器的 3 dB 带宽为 0.3 nm,反射率 98%,插入损耗不平坦度 $<1.5$  dB;极限分辨率 $<0.02$  nm。FBG 闲置的一端用匹配液匹配,以有效地消除端面反射的影响,使输出激光稳定。采用可调谐 FBG,其应变传递系数为 0.9,光纤弹性模量 156 GPa。图 2 为可调谐 FBG 的工作波长与调谐器位移的关系曲线,其波长调谐带宽达 42 nm(1570~1528 nm)。调谐过程中,中心波长的反射强度很稳定,且保持不变,重复性好。

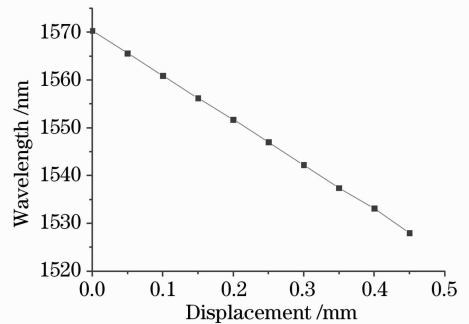


图 2 可调谐光纤布拉格光栅的调谐位移和波长关系

Fig. 2 Wavelength of the fiber Bragg grating as a function of tunable displacement

### 3 具有双稳态特性单纵模光纤激光器

输出激光功率得到明显的放大,且其输出光谱形态良好,最大输出功率 24 mW,效率 18.5%,稳定性 $\pm 0.005$  dB。经光衰减器衰减后,采用自由光谱范围(FSR)为 1.5 GHz 的激光扫描干涉仪观测到模式波形如图 3 所示。其纵模稳定,长时间观测无跳模现象。

光纤激光器输入-输出关系如图 4 所示(输出功率 3 mW 以下),从特性曲线上看,存在上升和下降两个阈值:当抽运功率上升时,输出功率阈值较高(b 点,52 mW),但达到阈值后,输出功率迅速上升到 d 点,斜率较高,而后斜率减小;当抽运功率下降时,经过 d 点后,输出功率曲线与上升曲线偏离,没

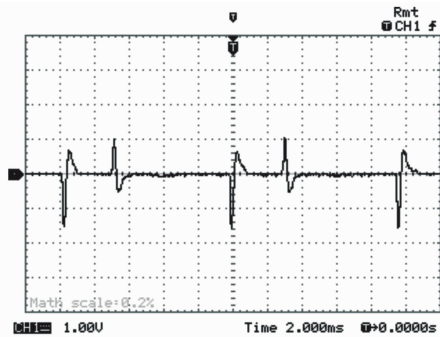


图3 光纤激光器输出纵模波形( $R_{fs} = 1.5$  GHz)

Fig. 3 Single-longitudinal mode spectrum of the fiber laser ( $R_{fs} = 1.5$  GHz)

有出现突然关断的情况,到达 a 点(14 mW)后输出停止。

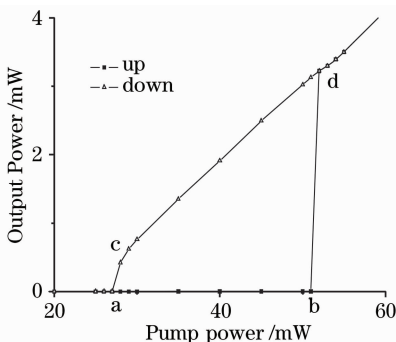


图4 光纤激光器输出功率和抽运功率的关系

Fig. 4 Output power of the single-longitudinal mode fiber laser as a function of absorbed pump power

由以上结果可知,下降阈值明显低于上升阈值,表现出光学双稳态特征。掺铒光纤用于环形腔光纤激光器中作为未抽运的饱和吸收体时,其吸收特性受到饱和吸收和驻波干涉效应的影响,是一种非线性吸收介质,其吸收系数并不是常数,在较强激光产生驻波干涉的作用下,其吸收系数随光强的增加而减小直至饱和,对信号光呈现透射率较高的特性。其吸收系数为

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + I / I_s), \quad (1)$$

式中, $\alpha_0$  为光强很小( $I \rightarrow 0$ )时的吸收系数, $I_s$  为掺铒光纤的饱和吸收光强, $I$  为入射光强。从以上实验结果可以看出,在能够实现有效饱和吸收的情况下, $I_s$  的大小与掺铒的浓度和光纤的长度有关,其值随掺铒光纤的浓度或者长度的增加而增加。 $\alpha_0$  一般很大,随着饱和吸收效应而逐渐下降到很小。

若损耗大于增益,则不会形成激光。随着抽运光强度的逐渐增大,掺铒光纤吸收系数 $\alpha$ 降低,腔内损耗降低。一旦增益达到腔内损耗值,腔内便会激发出激光,而且激光强度会迅速增强。若降低抽运

功率,功率特性曲线则会慢慢下降。达到 d 点后,由于光纤吸收系数 $\alpha$  仍然不变,对激光的损耗较低,增益仍能维持腔内损耗,激光不会消失。

## 4 激光器高速通信研究

高性能的单纵模光纤激光器最具前景的应用领域为高速通信的载波源,实验建立了高速传输系统进行光纤激光器载波测试。采用光采样示波器测量眼图效果,其主机为 Agilent 86100 A,电带宽 20 GHz,波长范围  $1 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ,采用 86103B 测试模块,其光带宽 20 GHz,灵敏度  $-15$  dBm。

经过外调制后,12.5 Gb/s 码速的发送眼图如图 5 所示,眼图的张开度和对称性很好,系统可以无误码的传输信号。眼图的对称性反映了系统信道传输特性的非线性效应,良好的对称性说明此系统的传输性能不会受到非线性效应十分明显的影响。

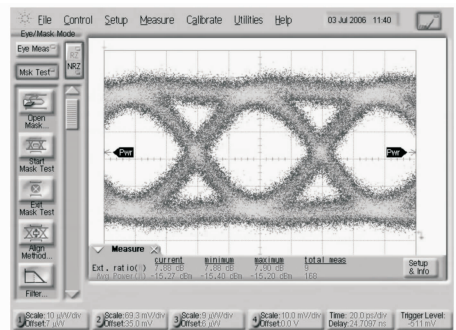


图5 12.5 Gb/s 码速的调制发送光眼图波形

Fig. 5 Eye diagram of 12.5 Gb/s signal for transmission

图 6 为传输 42 km 后测量到的光接收眼图。12.5 Gb/s 高速调制光信号的接收眼图眼皮厚度增加,张开度变小,码元过渡时刻的抖动范围也增大导致交叉点开始出现下移。说明传输链路中存在噪声和码间干扰,传输 42 km 距离后光脉冲出现一定的展宽。眼图的张开度受噪声和码间干扰的影响,当

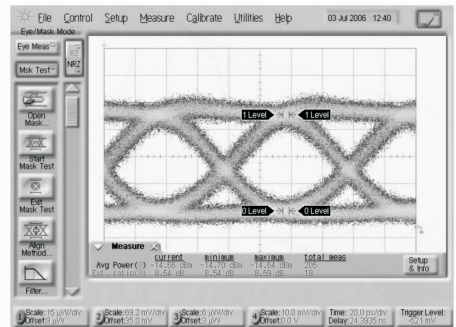


图6 接收光眼图波形

Fig. 6 Eye diagram for reception

输出端信噪比很大时, 张开度主要受码间干扰的影响, 从接收眼图可以看出仍有比较好的张开度, 说明经过链路的传输之后, 在接收端仍能恢复出传输数据, 调制光信号的消光比为 9.3 dB, 能够达到通信的基本要求, 传输质量没有受到影响。另外, 眼图中的定时抖动, 一方面是反映了链路中真实的抖动, 另一方面也可能是由于测量仪器本身和测量方法不当引入的。从实验结果可以看出, 光纤激光在高码速调制下的传输质量强于通常使用的半导体激光器。

## 5 结 论

设计了一种稳定的单纵模工作环形腔波长可调谐掺铒光纤激光器, 利用谐振腔内的一段掺铒光纤作为饱和吸收体, 形成驻波干涉从而实现激光工作在单纵模状态。低功率抽运能保证单纵模激光稳定性, 但输出光功率较低, 不适用于长距离传输, 采用一只 980 nm 激光二极管经分路器同时抽运光纤激光器和光纤放大器, 低功率、模式稳定的激光输出后, 再进入放大器提高输出功率, 从而获得了模式稳定的单纵模激光, 功率可达 24 mW。作为饱和吸收体的未抽运掺铒光纤对信号光产生非线性吸收, 形成明显的光学双稳态特性。用于高速光通信载波源, 作为 12.5 Gb/s 高速码率调制实验, 无误码传输 42 km。在未来大容量、长距离光纤通信及光纤传感领域有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Cheng Y., Kringlebotn J. T., Loh W. H. *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 2 Y. W. Song, S. A. Havstad, D. Starodubov *et al.*. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(11): 1167~1169
- 3 Jun Li, Yubin Guo, Tianshu Wang *et al.*. An all-fiber type Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 503~505
- 4 Alexander Polynkin, Pavel Polynkin, Masud Mansuripur *et al.*. Single-frequency fiber ring laser with 1 W output power at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3179~3184
- 5 Nathaniel J. C. Libatique, Li Wang, Ravi K. Jain. Single-longitudinal-mode tunable WDM-channel-selectable fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25): 1503~1507
- 6 Ren Guangjun, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Experimental study on polarization-maintaining fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1208~1211  
任广军, 姚建铨, 王 鹏 等. 保偏光纤激光器的实验研究 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1208~1211
- 7 Wang Tianshu, Guo Yubin, Li Jun. All-fiber type short cavity Er/Yb co-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1161~1164  
王天枢, 郭玉彬, 李 军. 全光纤型 Er/Yb 共掺光纤短腔激光器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1161~1164
- 8 Chien-Hung Yeh, Sien Chi. A broadband fiber ring laser technique with stable and tunable single-frequency operation [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(14): 5240~5244
- 9 T. S. Wang, Y. B. Guo, K. Wang. Analyzing longitudinal-mode of single-frequency ring fiber laser [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(6): 1494~1497
- 10 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 217~220  
俞本立, 甄胜来, 朱 军 等. 低噪声光纤激光器的实验研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 217~220