

超低重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

陈炯 贾东方 杨敬文 刘彤辉 王肇颖 杨天新

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了一种新颖的全光纤超长环形腔掺铒光纤激光器。该激光器采用非线性偏振旋转(NPR)技术实现自启动锁模,除了 NPR 元件外,其余全部由单模光纤(SMF)元件组成。通过加入 4 km 的 SMF 构成长达 4.046 km 的环形腔,产生了重复频率为 50.92 kHz 的稳定锁模脉冲,最大平均输出功率为 2.73 mW,对应的单脉冲能量为 53.61 nJ。

关键词 激光器;被动锁模;非线性偏振旋转;超低重复频率

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0602005

All-Fiber Passively Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser with Ultra-Low Repetition Rate

Chen Jiong Jia Dongfang Yang Jingwen Liu Tonghui Wang Zhaoying Yang Tianxin

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract A novel all-fiber ultra-long ring cavity erbium-doped fiber laser is reported. The laser consists of only single mode fiber (SMF) components except the nonlinear polarization rotation (NPR) parts which are utilized to achieve self-starting passively mode-locking. The total length of the ring cavity amounts to 4.046 km, which is achieved by incorporating a 4 km SMF. In experiment, the laser generates stable mode-locked pulses with a 50.92 kHz fundamental repetition rate. The maximum average power of output pulses is 2.73 mW, which corresponds to a single pulse energy of 53.61 nJ.

Key words lasers; passively mode-locked; nonlinear polarization rotation; ultra-low repetition rate

OCIS codes 140.3500; 140.3510; 140.4050

1 引言

低重复频率(数十千赫兹)的超短光脉冲被广泛应用于微机械加工、生物医学诊断和激光雷达探测等领域^[1~3]。通常,调 Q 激光器可以产生重复频率为 1~200 kHz 的光脉冲^[4],但其脉冲宽度达数十纳秒。而被动锁模光纤激光器可以产生超短脉冲^[5](皮秒或飞秒量级),但它们的重复频率通常却高达数十兆赫兹。传统方法是用泡克耳斯盒或声光调制器作为脉冲选择器^[6],来降低锁模光纤激光器的重

复频率,但这易受到高压开关的速度和晶体的压电效应的影响,同时系统结构复杂,功率效率较低。目前,降低锁模光纤激光器重复频率的有效方法之一是延长激光器的腔长^[7~13]。长腔被动锁模光纤激光器因结构简单、尺寸小、成本低、易于维护等优点而引起广大研究人员的关注。在 2007 年的 OFC 会议上, Fong 等^[14]报道了重复频率为 1.7 MHz、单脉冲能量为 1 nJ、脉宽为 200 fs 的锁模掺铒光纤激光器,这也是首次同类激光器中将重复频率降至 1 MHz 左右。

收稿日期: 2012-02-04; 收到修改稿日期: 2012-03-01

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806)、天津市自然科学基金(11JCYBJC01300, 12JCYBJC10800)和天津大学自主创新基金资助课题。

作者简介: 陈炯(1988—),男,硕士研究生,主要从事锁模光纤激光器方面的研究。E-mail: chenjiong2011@126.com

导师简介: 贾东方(1971—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信和非线性光纤光学等方面的研究。

E-mail: jiadf@tju.edu.cn(通信联系人)

2008年, Kobtsev等^[15]报道了一种腔长达3.8 km的光纤激光器, 锁模脉冲重复频率仅为77 kHz, 直接输出脉冲能量为3.9 μ J, 这也是迄今不采用调Q、腔倒空技术和光放大器直接从锁模光纤激光器中得到的最大脉冲能量, 引起了极大的轰动, 但该实验采用的增益介质是掺镱光纤, 而且输出脉冲很宽(为3 ns)。2010年, Denisov等^[16]报道了一种腔长为1.25 km的自启动锁模掺铒光纤激光器, 获得了重复频率为82.4 kHz、单脉冲能量为564.3 nJ、脉宽为5 ns的输出脉冲。

本文报道了一种超长环形腔被动锁模掺铒光纤激光器。该激光器采用非线性偏振旋转(NPR)技术实现自启动锁模, 除了NPR元件外, 全部由单模光纤(SMF)元件组成, 结构简单, 体积小巧。通过加入4 km的SMF构成长达4.046 km的环形腔, 实验获得了重复频率为50.92 kHz、单脉冲能量为53.61 nJ的输出脉冲。

2 实验及结果分析

超长环形腔被动锁模掺铒光纤激光器的实验装置如图1所示。该光纤激光器的增益光纤是一段在1550 nm处色散系数为 $-25 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的3 m长的掺铒光纤; 其他元件的尾纤均为SMF, 在1550 nm处的色散系数为 $17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。通过在腔内加入4 km长的SMF, 使总腔长达4.046 km, 腔内净色散为 -9.5 ps^2 。单级偏振相关隔离器(PI-ISO)除了保证环形腔内光脉冲的单向传输, 减小腔内器件由于反射引起的后向散射外, 还作为偏振器产生线偏光, 同时连同两片偏振控制器, 一起调控光脉冲的偏振状态。它们与光纤中的弱双折射和克尔效应相结合, 共同提供NPR机制, 以实现锁模的自启动。

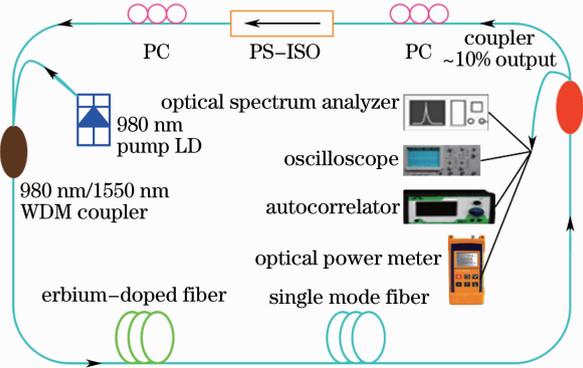


图1 超长环形腔被动锁模掺铒光纤激光器的实验结构
Fig. 1 Experimental setup of ultra-long ring cavity passively mode-locked erbium-doped fiber laser

中心波长为976 nm的抽运激光通过一个980 nm/1550 nm的波分复用器耦合进环形腔, 并通过一个90:10的输出耦合器输出光脉冲。实验中, 在10%的输出端分别用TDS500 MHz 3052C数字荧光示波器和Ando AQ-6315A光谱分析仪探测输出光脉冲。

实验中, 通过适当调整两片偏振控制器来改变光脉冲的偏振状态, 当抽运激光器的输出功率为100 mW时, 获得了重复频率为50.92 kHz的稳定的锁模脉冲, 如图2所示。此时通过光功率计测得平均输出光功率为0.95 mW, 对应的单脉冲能量为18.66 nJ。图3显示了中心波长为1530.95 nm的光谱图, 其3 dB带宽为4.902 nm。若假设输出的锁模脉冲为高斯型, 根据计算其相应的变换极限宽度为713 fs。然而, 因为腔内的负色散较大, 输出脉冲是高度啁啾的, 实验中用自相关仪很难测到输出脉冲的宽度。

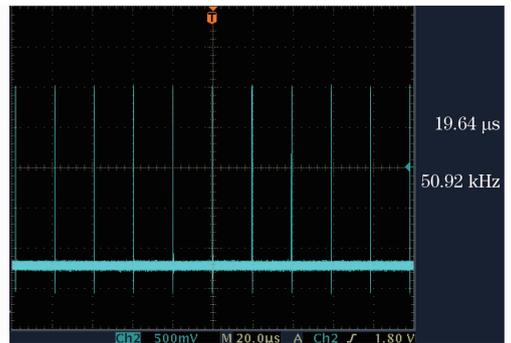


图2 重复频率为50.92 kHz的锁模脉冲序列
Fig. 2 Mode-locked pulse train with repetition rate of 50.92 kHz

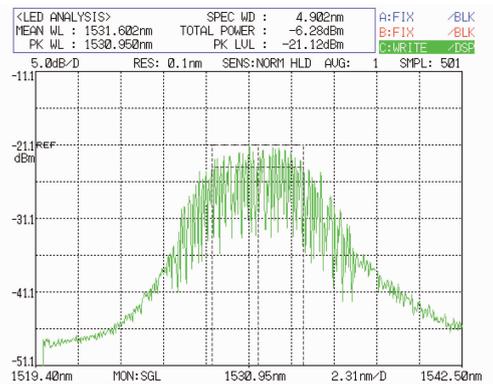


图3 锁模脉冲的光谱

图4、5分别给出了锁模脉冲的平均输出功率和单脉冲能量、3 dB带宽在抽运激光器不同输出功率下的变化。由图可知, 随着抽运激光器输出功率的增加, 平均输出功率和单脉冲能量、3 dB带宽均增

加。当抽运激光器的输出功率为 182 mW 时,锁模脉冲的平均输出功率为 2.73 mW,对应的单脉冲能量为 53.61 nJ。

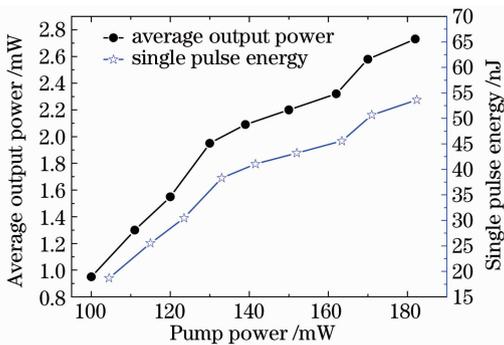


图 4 不同抽运功率下锁模脉冲的平均输出功率和单脉冲能量

Fig. 4 Average output power and single pulse energy of mode-locked pulse with different pump powers

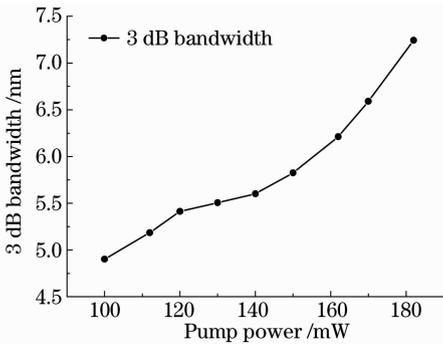


图 5 不同抽运功率下锁模脉冲的 3dB 带宽

Fig. 5 3 dB bandwidth of mode-locked pulse with different pump powers

3 结 论

实验研究了一种超长环形腔被动锁模掺铒光纤激光器,该激光器在不需腔外消啁啾的情况下,能产生重复频率为 50.92 kHz、单脉冲能量达 53.61 nJ 的稳定的输出脉冲。通过适当改变输出耦合比或增加抽运激光器的输出功率,可以获得更高的单脉冲能量。正是因为有进一步增加脉冲能量的可能,再加上结构简单、体积小、性能稳定、成本较低,这种环形长腔激光器在低重复频率激光器的领域有非常好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 V. Couderc, A. Albert, A. Barthélémy. Low repetition rate of a mode-locked Nd:YAG laser using quadratic polarization switching [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**(4-6): 413~417
- 2 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics and Applications*[M]. San Diego: Academic Press, 2010. 526~528
- 3 Zhong Yihui, Zhang Xuzing, Tao Xiangyang. Research progress of passively mode locked fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 46~51
钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 46~51
- 4 Zhao Shengzhi. Study on Characteristics of All-Solid-State Q-Switched and Mode-Locked Short Pulse Lasers [D]. Jinan: Shandong University, 2007. 3~10
赵圣之. 全固化短脉冲调 Q、锁模激光特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2007. 3~10
- 5 H. Sayinc, D. Mortag, D. Wandt *et al.*. Sub-100 fs pulses from a low repetition rate Yb-doped fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5731~5735
- 6 T. Yanagisawa, K. Asaka, K. Hamazu *et al.*. 11-mJ 15-Hz single-frequency diode-pumped Q-switched Er, Yb: phosphate glass laser[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16): 1262~1264
- 7 Chen Jiog, Jia Dongfang, Wu Yongchao *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a submegahertz repetition rate[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(11): 114203
- 8 Xiao Hongfei, Ren Jianhua. Experimental study of the tunableness of erbium-doped optical fiber ring laser [J]. *Laser Journal*, 2010, **31**(4): 13~14
肖鸿飞, 任建华. 环形腔掺铒光纤激光器调谐实验研究[J]. *激光杂志*, 2010, **31**(4): 13~14
- 9 S. K. Turitsyn, J. D. Ania-Castanon, S. A. Babin *et al.*. 270-km ultralong raman fiber laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(13): 133901
- 10 Zhao Hui, Chai Lu, Ouyang Chunmei. A long-cavity all-normal-dispersion mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 2958~2963
赵 慧, 柴 路, 欧阳春梅. 长腔全正常色散锁模掺铒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 2958~2963
- 11 W. H. Renninger, A. Chong, F. W. Wise. Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **77**(2): 023814
- 12 M. Zhang, L. L. Chen, C. Zhou *et al.*. Mode-locked ytterbium-doped linear cavity fiber laser operated at low repetition rate [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(9): 657~660
- 13 J. Chen, D. F. Jia, Y. C. Wu *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a sub-megahertz repetition rate [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(11): 114203
- 14 K. H. Fong, S. Y. Set, K. Kikuchi. High-energy ultrashort pulse generation from fundamentally mode-locked fiber laser at 1.7 MHz [C]. *OFC' 2007*. 25~29
- 15 S. Kobtsev, S. Kukarin, Y. Fedotov. Ultra-low repetition rate mode-locked fiber with high-energy pulses [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21936~21941
- 16 V. I. Denisov, B. N. Nyushkov, V. S. Pivtsov. Self-mode-locked all-fiber erbium laser with a low repetition rate and high pulse energy [J]. *Quantum Electron.*, 2010, **40**(1): 25~27

栏目编辑: 宋梅梅