

文章编号: 0253-2239(2009)11-3094-04

50 fs 输出的全光纤展宽脉冲激光器

邓定桓 詹黎 顾照昶 顾焱 夏宇兴

(上海交通大学物理系区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 利用非线性偏振旋转锁模方法并引进激光谐振腔色散管理, 在 1550 nm 波段上用展宽脉冲全光纤激光器直接产生 50 fs 无波分裂的高能量脉冲输出。在 330 mW 的抽运功率下平均输出功率为 56.4 mW, 单脉冲能量达到 1.5 nJ。因为是全光纤结构, 激光器的转换效率高达 17%。输出光谱平滑, 无任何边带存在, 激光器处于无波分裂的单脉冲输出状态。

关键词 超快光学; 光纤激光器; 非线性偏振旋转; 展宽脉冲光纤激光器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3094

50 fs Pulse Generation from All-Fiber Stretched-Pulse Laser

Deng Dinghuan Zhan Li Gu Zhaochang Gu Yi Xia Yuxing

(State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Physics,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Using the nonlinear polarization rotation mode-locking and cavity dispersion management, we report the direct generation of 50-fs pulses from a stretched-pulse Er-doped ring laser with all-fiber construction. The average output power was 56.4 mW under a 330 mW pump power with a repetition rate of 37.8 MHz, which had relatively high conversion efficiency of 17% for all-fiber construction. The pulse energy was greatly improved to 1.5 nJ. The smooth output spectrum without any side lobe showed the laser worked on the single-pulse operation.

Key words ultrafast optics; fiber laser; nonlinear polarization rotation; stretched-pulse fiber laser

1 引 言

超短脉冲掺铒光纤激光器操作简单, 而且在光频标^[1,2]、光脉冲放大器的种子光源、光孤子通信、太赫兹产生、生物传感等方面具有重要的应用前景, 引起了人们的广泛关注。光纤的硅玻璃材料在 1550 nm 波段上工作在反常色散区, 但是通过合理设计光纤的波导色散, 光纤可以工作在正常色散或者反常色散区域, 因此被动锁模的光纤激光器可以工作在孤子和非孤子状态。目前, 在两个状态下都已经产生了低于 100 fs 的超短脉冲^[3~6], 而非孤子状态的光纤激光器能够更好的控制谐振腔的色散, 被认为是一种更好实现超短脉冲的方法, 通称为展宽脉冲光纤环形激光器(stretched-pulse fiber ring

laser)^[7]。这一类激光器能够使得脉冲在激光谐振腔内被展宽压缩两次, 减少了高能量脉冲在光纤中传输的非线性效应。为了减少非线性效应, 脉冲在激光腔中累积的非线性相移一般要小于 π 以避免波分裂。要进一步提高激光腔所能容纳的非线性相移, 对色散管理提出了进一步的要求, 增益光纤也要求尽可能的短^[8]。在掺铒光纤激光器中, 增益介质的掺杂浓度可以做得很高, 极短的一段掺铒光纤就可以满足增益要求, 掺铒光纤则很难做到如此高的浓度, 因此掺铒光纤激光器的增益光纤一般都比较长, 累积的非线性效应更大, 容易引起波分裂, 极大地影响了输出脉冲质量, 因此实现无波分裂的脉冲输出成为近年来的研究热点^[8~10]。

国内光纤飞秒激光器的研究虽然起步较晚, 但

收稿日期: 2009-01-06; 收到修改稿日期: 2009-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(10874118)和晨星青年学者奖励计划(T241460636)资助项目。

作者简介: 邓定桓(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤飞秒激光器方面的研究。E-mail: dengdinghuan@sjtu.edu.cn

导师简介: 詹黎(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤激光器及光纤光学方面的研究。E-mail: lizhan@sjtu.edu.cn

是也取得了不少进展^[11~16],我们也实现了 75 fs 输出的全光纤超短脉冲激光器^[17]。本文是在此研究基础上,进一步优化腔的色散管理,使用非线性偏振旋转锁模,在全光纤展宽脉冲激光器直接产生了 50 fs 无波分裂的超短光脉冲。作为增益介质的同时,在 1550 nm 工作在正常色散的高掺杂铒光纤也被用于谐振腔的色散管理,以补偿普通单模光纤的反常色散。在 330 mW 的抽运功率下,激光器平均输出功率达到 56.4 mW,重复频率为 37.8 MHz,光谱宽度为 61 nm。单脉冲能量提高到 1.5 nJ,峰值功率达到了 23 kW。

2 实验装置

对于展宽脉冲光纤环形激光器,为了让掺铒光纤在 1550 nm 波段附近工作在正常色散区,必须设计相对大的正常波导色散去补偿硅材料的反常色散,这样就使得掺铒光纤芯径相对与普通单模光纤的芯径要小,由于孤子面积定理,掺铒光纤的饱和就成了输出脉冲能量的主要限制^[7]。为此尽量选用具有芯径相对较大的掺铒光纤,其模场直径为 $4.9 \mu\text{m}$,色散参数为 $-51 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,这样能够在补偿普通单模光纤的反常色散的同时,获得尽可能大的脉冲能量输出。激光脉冲在谐振腔中经历的大量的正常色散与反常色散,被展宽和压缩了 2 次,减少了在放大过程中的非线性饱和,由此保证了更窄宽度,更高能量脉冲的输出。优化了掺铒光纤的长度为 135 cm,然后通过剪短普通单模光纤的长度来优化激光器的总色散,实现最窄脉冲的输出。

图 1 为展宽脉冲掺铒光纤激光器的原理图,全光纤的环形腔由一段 135 cm 的高掺杂铒光纤,用 976 nm 的二极管激光器通过一个 980/1550 波分复用器(WDM)进行前向抽运,一段 330 cm 的普通单模光纤(SMF-28)和一段 78 cm 长的 Nufern 980 光纤组成,各光纤的色散参数分别为: $-51, 18$ 和 $4.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。10% 的输出耦合器(OC)被放在增益掺铒光纤后面直接输出能量,这个输出位置可以使得进入激光环形腔的脉冲强度变小,减少激光腔中光纤的非线性效应^[4,5],偏振相关隔离器(PDI)以及两个偏振控制器(PC1 和 PC2)作为锁模器件连接在激光腔中,输出口可以经过分光连接到自相关仪,光谱分析仪和光电探测器来检测锁模情况和脉冲情况。

3 实验结果与讨论

激光器在偏振相关隔离器的作用下实现单向运

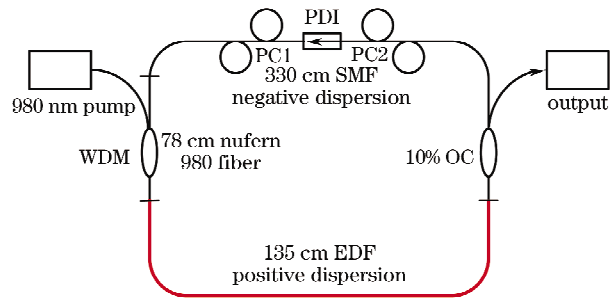


图 1 展宽脉冲光纤环形激光器原理图。其中 EDF 为掺铒光纤, WDM 为 980/1550 波分复用器, PC1 和 PC2 为偏振控制器, PDI 为偏振相关隔离器, OC 为输出耦合器

Fig. 1 Configuration of stretched-pulse fiber ring laser. EDF: erbium-doped fiber, WDM: 980/1550 wavelength division multiplexer, PC1 and PC2: polarization controllers, PDI: polarization dependent isolator, OC: output coupler

转,激光器为非线性偏振旋转锁模^[7],当抽运功率达到锁模阈值后,通过调节偏振控制器可以从辐射噪声中实现稳定的锁模脉冲输出^[18]。通过实验优化,发现在激光腔长度为 $4\sim 6 \text{ m}$ 时都可以实现稳定的锁模状态,在激光腔长度太长或者太短的情况下,可以在示波器上观测到多脉冲分裂状态^[19]或者高阶锁模状态。一般情况下,脉冲的宽度都大于 100 fs,但是仔细调节偏振控制器,使得脉冲中间最强的部分刚好能通过偏振相关隔离器,脉冲两边沿被偏振相关隔离器阻挡,进一步窄化脉冲,此时在自相关仪上的信号强度会出现明显的增强,脉冲宽度也随之下下降,光谱逐渐变得光滑起来,光谱上的连续分量和边锋逐渐消失了,表明激光器处于最佳的锁模状态。激光器一旦锁模稳定之后,可以在光学平台上稳定工作,其在示波器上的脉冲形状始终保持不变,除非有外界干扰或者有输出光被背向反射回激光谐振腔中。其典型输出脉冲序列如图 2 所示。

经过色散补偿优化发现,最佳的激光谐振腔长度为 543 cm,各种光纤的长度如图 1 所示。通过计算得出腔内总的群速度色散量 β'' 约为 $+0.012 \text{ ps}^2$,要产生最短的脉冲,其总色散量必须接近零但略为正值^[20]。在这个腔长下,通过优化输出端的单模光纤长度腔外压缩脉冲找到最好的锁模二阶强度自相关信号,结果如图 3 所示。由于在如此高的峰值功率下,光纤中的三阶色散和其他非线性效应无法忽略^[21]而且所有光纤的三阶色散都为正值,累积起来的三阶非线性效应使得脉冲有一些倾斜,在自相关信号的两边翼可以看到 2 个小峰存在。实验中所观察到的最短自相关信

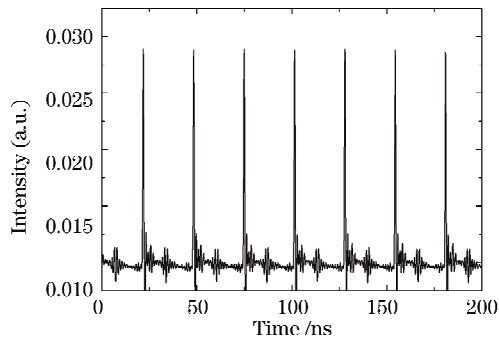


图 2 从示波器上观察到的输出脉冲序列
Fig. 2 Pulses train output from stretched-pulse
fiber ring laser

号为 78.1 fs, 假设脉冲形状为双曲正割的情形下其输出脉冲的宽度应为 50 fs。

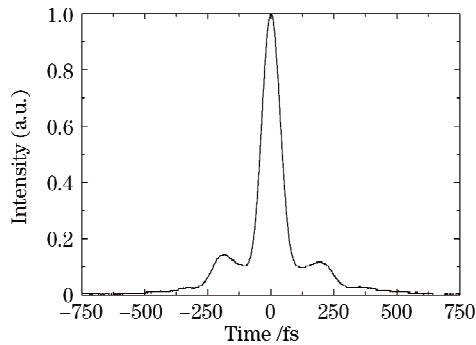


图 3 激光器输出脉冲的自相关轨迹

Fig. 3 Output pulse autocorrelation trace of the laser

图 4 为在 50 fs 脉冲输出下对应的输出光谱, 其光谱宽度为 61 nm, 中心波长在 1570 nm 附近。由此可以计算出时间带宽积为 0.37, 表明脉冲已经接近转换极限。在锁模情况下, 测量了其输出功率, 在 330 mW 的抽运功率下其平均输出功率达到了 56.4 mW, 重复频率为 37.8 MHz, 单脉冲能量为 1.5 nJ, 激光器达到 17% 的高转换效率。这个转换效率对于非全光纤结构的激光器很难实现, 因为每个器件都具有较大的插入损耗, 而光纤的熔接损耗相对较小。考虑到自相关信号上两边翼小峰所包含的能量应该小于 23%, 脉冲的峰值功率达到 23 kW。由于使用的掺铒光纤具有极高的掺杂浓度和较大的 4.9 μm 的模场直径, 取得了较高的转换效率和较高单脉冲能量。平滑的光谱没有任何边带, 表明锁模状况稳定, 激光器处于无波分裂单脉冲输出状态, 光谱在 1535 nm 之前的明显下降是由于没有完全粒子数反转的铒离子在 1531 nm 处的强本征吸收所引起的。另外, 掺铒光纤增益也并非平坦, 如果增益平坦的话输出的光谱应该接近于高斯形状。

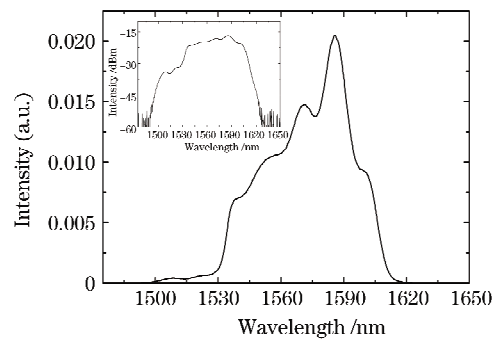


图 4 在 50 fs 脉冲输出下的对应光谱图, 插图为对数坐标图

Fig. 4 Output spectrum under 50 fs pulses output from the laser, the inset is given in logarithmic scale

4 结 论

利用非线性偏振旋转锁模在展宽脉冲掺铒光纤激光器中实现了 50 fs 超短光脉冲的直接输出。仔细优化激光腔长度和色散管理, 能够使输出光谱平滑处于无波分裂的单脉冲输出状态, 从而减少了非线性效应, 极大提高了输出光脉冲的质量和实际可利用峰值功率, 单脉冲能量达到了 1.5 nJ。全光纤结构激光器操作简单, 稳定运行, 并同时具有较高的 17% 的转换效率。

参 考 文 献

- 1 Jens Rauschenberger, Tara M. Fortier, David J. Jones *et al.*. Control of the frequency comb from a modelocked erbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **10**(24): 1404~1410
- 2 B. R. Washburn, S. A. Diddams, N. R. Newbury. Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(3): 250~252
- 3 M. Nakazawa, E. Yoshida, Y. Kimura. Generation of 98 fs optical pulses directly from an erbium-doped fibre ring laser at 1.57 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 63~65
- 4 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13): 1080~1082
- 5 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus. Pulse dynamics in stretched-pulse fiber lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(2): 158~160
- 6 D. Y. Tang, L. M. Zhao. Generation of 47-fs pulses directly from an erbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 41~43
- 7 L. E. Nelson, D. J. Jones, K. Tamura *et al.*. Ultrashort-pulse fiber ring laser[J]. *Appl. Phys.*, 1997, **B65**: 277~294
- 8 A. Ruehl, H. Hundertmark, D. Wandt *et al.*. 0.7 W all-fiber erbium oscillator generating 64 fs wave breaking-free pulses[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6305~6309
- 9 M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(28): 6010~6013
- 10 F. Ö. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21): 213902(1-4)

- 11 Liu Dongfeng, Chen Guofu, Wang Xianhua. Experimental studies of self-starting passive mode locking Er^{3+} -doped fiber ring laser[J]. *Science in China (Series A)*, 1999, **42**(9): 980~986
刘东峰, 陈国夫, 王贤华. 自起振被动锁模掺 Er^{3+} 光纤环形腔孤子激光器的实验研究[J]. *中国科学(A 辑)*, 1999, **29**(7): 656~661
- 12 Wang Zhaoying, Yu Zhenhong, Gao Peiliang *et al.*. Figure-eight shape actively and passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1341~1345
王肇颖, 余震虹, 高培良等. 8 字形主被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1341~1345
- 13 Wang Zhaoying, Wang Yongqiang, Li Zhiyong *et al.*. Actively passively mode-locked erbium-doped fiber laser with dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 645~650
王肇颖, 王永强, 李智勇等. 基于色散不对称光纤环形镜的锁模光纤激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 645~650
- 14 Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs Passively mode-locked Er^{3+} -doped fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1174~1177
宋方, 徐文成, 陈伟成等. 78 fs 被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1174~1177
- 15 Gao Weiqing, Xu Lixin, Ming Hai *et al.*. Theoretical analysis of passively mode-locked erbium-doped fiber laser with positive dispersion cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 82~86
高伟清, 许立新, 明海等. 正色散腔被动锁模掺铒光纤激光器的理论分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 82~86
- 16 Li Jing, Dai Yongheng, Zhang Zhigang. High repetition rate passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(5): 706~708
李婧, 戴永恒, 张志刚. 高重复频率被动锁模的掺 Er 光纤激光器[J]. *科学通报*, 2008, **53**(1): 66~68
- 17 Deng DingHuan, Zhan Li, Xia YuXing. 75-femtosecond all-fiber ultrashort pulse laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(13): 1937~1940
邓定桓, 詹黎, 夏宇兴. 75 fs 全光纤超短脉冲激光器[J]. *科学通报*, 2008, **53**(1): 36~39
- 18 K. Tamura, J. Jacobson, E. P. Ippen *et al.*. Unidirectional ring resonators for self-starting passively mode-locked lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3): 220~222
- 19 L. M. Zhao, D. Y. Tang, T. H. Cheng *et al.*. Generation of multiple gain-guided solitons in a fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1581~1583
- 20 K. Tamura, L. E. Nelson, H. A. Haus *et al.*. Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2): 149~151
- 21 M. L. Dennis, I. N. Duling III. Third-order dispersion in femtosecond fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1750~1752