

输出大啁啾脉冲的展宽脉冲锁模光纤激光器

石明威 刘博文 王思佳 柴路 胡明列 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了一种大啁啾脉冲输出的全光纤展宽脉冲锁模激光器,以非线性偏振旋转(NPR)实现自启动锁模。激光器其余部分为全单模光纤(SMF)结构,提供很大的正色散,光栅对提供色散补偿,输出展宽脉冲。实验中得到了重复频率36.96 MHz,单脉冲能量1.81 nJ的稳定锁模脉冲序列,使用频谱分析仪观测得到脉冲序列一次谐波信噪比(SNR)达到80 dB。直接输出脉冲有很大的正啁啾,脉宽为2.17 ps,经过腔外压缩可获得70 fs的脉冲。这种能压缩到百飞秒量级的大啁啾脉冲非常适用于光纤啁啾脉冲放大(CPA)系统。

关键词 激光器;全光纤展宽脉冲锁模激光器;大啁啾;飞秒脉冲

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202007

Generation of Giant-Chirp Laser Pulses in a Stretched-Pulse Mode-Locked Fiber Laser

Shi Mingwei Liu Bowen Wang Sijia Chai Lu Hu Minglie Wang Chingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A stretched-pulse mode-locked fiber laser which can generate giant-chirp is reported. The nonlinear polarization (NPR) is applied to start the mode-locking. The laser consists of long single mode fiber (SMF) providing large normal dispersion, and grating pairs are utilized for compensation. The mode-locking laser operates at the normal-dispersion region, generates giant-chirp pulses of 2.17 ps and pulse energy of 1.81 nJ at a repetition rate of 36.96 MHz. The giant-chirp pulses are dechirped to a pulse duration of 70 fs. A more than 80 dB signal-to-noise ratio (SNR) for fundamental harmonic of the pulse train is observed in radio frequency analyzer. This kind of giant-linear chirp mode-locking laser is very suitable for chirp pulse amplification (CPA) system.

Key words lasers; all fiber stretch-pulse mode-locked laser; giant-chirp; femtosecond pulse

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3615; 140.4050

1 引 言

近年来,随着飞秒激光加工、生物光子学、非线性光学等领域的应用扩展,对飞秒激光平均功率以及单脉冲能量提出了越来越高的要求,高功率飞秒激光放大系统成为了超快光学的研究热点^[1~5]。一般地,为了得到微焦量级以上的高能量脉冲输出,光纤激光放大系统有一个或多个放大级。为了在放大

过程中减少脉冲的非线性相移积累,啁啾脉冲放大(CPA)系统应运而生^[6]。CPA系统有着很大的潜力与诸多优点,然而,复杂的结构、高昂的维护费用使得CPA系统并没有广泛地替代固体激光放大系统。为了更好地挖掘光纤激光器的潜力,充分利用CPA系统的优越性,最新的科研工作将研究重点放在简化CPA系统、选择合适的种子源上。在2008

收稿日期: 2011-09-22; **收到修改稿日期**: 2011-11-07

基金项目: 国家973计划(2011CB808101、2010CB327604),国家自然科学基金(60838004、61078028),全国优秀博士学位论文作者专项资金(2007B34)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)的资助课题。

作者简介: 石明威(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤飞秒激光技术的理论和实验等方面的研究。

E-mail: smithmw@tju.edu.cn

导师简介: 胡明列(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事超短脉冲激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn(通信联系人)

年, Renninger 等^[7] 理论计算并实现了 140 ps, 3 MHz 重复频率的巨啁啾锁模脉冲输出, 其平均功率为 50 mW。该激光器有脉冲宽、重复频率低的特点, 将传统 CPA 系统中振荡级、展宽器、脉冲选择器的功能融合到一起, 简化了传统复杂的 CPA 系统, 降低了整体成本。但是由于采用了过长的单模光纤 (SMF), 大量的正啁啾以及非线性相移的积累, 使得该输出脉冲过宽, 达到了 150 ps 量级, 经过放大、压缩后为 0.67 ps 的亚皮秒量级。2011 年, Chichkov 等^[8] 实现了全正色散耗散孤子锁模激光器, 其输出单脉冲能量达到 0.5 μJ , 4.3 MHz 重复频率, 压缩后脉宽达到 0.76 ps 的亚皮秒量级。文献^[7,8] 中所报道的激光器, 其过宽的脉冲宽度, 降低了其峰值功率, 限制了应用场合。为了得到较高的峰值功率, CPA 系统中的种子源, 必须有极大的线性啁啾, 而且压缩后能得到飞秒量级的脉宽, 纳焦量级的单脉冲能量以及较低的重复频率。具有这些条件的种子源, 既能够提供大线性啁啾低重复频率脉冲, 以简化传统 CPA 系统中的展宽器、脉冲选择器, 又能够提供较大的单脉冲能量, 以简化传统 CPA 系统中的预放大级。

本文报道了一种大啁啾脉冲输出的展宽脉冲锁模光纤激光器, 采用非线性偏振旋转 (NPR) 技术实现自启动锁模, 整个振荡器除了 NPR 元件和色散补偿器件外, 其余光路限制在光纤中传播, 运转稳定, 体积小巧。而且 NPR 锁模有良好的自启动特性, 稳定的锁模状态, 没有半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的损伤阈值等优点, 能够产生更高单脉冲能量的稳定锁模序列^[9~11]。在锁模方式的选择方面, 由于展宽脉冲锁模容易建立锁模状态, 且锁模状态稳定, 脉冲周期性展宽压缩能够输出高线性啁啾的宽脉冲序列^[12], 较宽的脉宽是传统 CPA 系统中振荡级和展宽器的集成, 为简化 CPA 系统提供了可能, 另一方面, 高线性啁啾经过腔外压缩产生高功率的窄脉冲, 也为非线性放大后的再次压缩提供了基础。

2 实验装置

实验所搭建的展宽脉冲锁模光纤激光器如图 1 所示。该激光器采用光栅对作为色散补偿器件, 使得激光器工作在零色散点附近展宽脉冲锁模域。谐振腔主要由 3 个部分构成: HI 1060 型单模光纤 SMF1 和 SMF2, 高掺杂的掺镱单模光纤 (YDF) 以及 NPR 和色散补偿构成的空间光路。其中, SMF1

为 0.8 m, SMF2 为 4 m, 增益光纤为 0.4 m。偏振无关隔离器 (ISO) 保证了环形腔内脉冲的单向传输, 其中心波长为 1040 nm, 尾纤长度包含在 SMF2 内。由四分之一波片 (QWP)、二分之一波片 (HWP) 和偏振分束器 (PBS) 构成的偏振选择器件, 与单模光纤中产生的非线性效应自相位调制 (SPM) 和两个正交偏振态之间的交叉相位调制 (XPM) 作用形成的偏振强度相关, 共同形成 NPR 作用^[13], 其中 PBS 导出端作为激光器输出, 用于监视激光器状态和测量相关参数。空间光路包含用作色散补偿的光栅, 实验使用光栅为 600 线反射式光栅, 光栅间距大约 7 cm, 入射角 20°。实验采用最大功率为 580 mW 的 980 nm 单模 LD 作为抽运, 通过 1040/980 波分复用器 (WDM) 耦合入激光器腔内, 对增益光纤进行抽运, HR 为高反射镜。

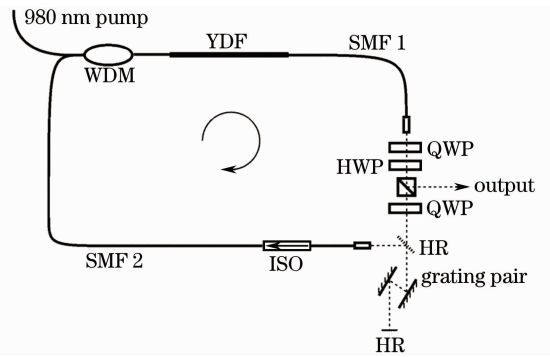


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

3 实验结果与讨论

实验中, Yb 增益光纤在抽运光抽运下, 抽运功率达到 182 mW 时, 产生锁模脉冲, 在单模光纤中由于 SPM 和两个正交偏振态之间的 XPM 等非线性效应, 产生了偏振与强度相关的传输脉冲, 通过对 3 个波片的仔细调整, 使得脉冲中心所对应的偏振方向得到通过, 而脉冲两沿对应的偏振方向受到削弱, 以此对脉冲进行窄化, 从而实现 NPR 锁模。实验装置中光栅为激光器提供了负色散, 实验选取了合适的光栅间距 7 cm 和入射角度 20°, 由数值计算得出, 光栅提供了 -0.1135 ps^2 的负色散, 补偿了系统中 5.1 m SMF 产生的 0.1173 ps^2 正色散, 使得系统净色散略微大于零色散点, 为 0.01 ps^2 量级, 实现了正色散域的展宽脉冲锁模。在功率为 238 mW 的抽运光抽运下, 实验测得输出脉冲平均功率为 67 mW。输出光入射到上升沿为 100 ps 的快速响应的光电二极管, 并用示波器监视脉冲序列, 如图 2 所

示。脉冲运转稳定,示波器测量得到脉冲重复频率为36.97 MHz,能够实现开机自启动。实验中使用光谱仪(YOKOGAWA AQ6370B)对输出脉冲进行了光谱测量,得到光谱如图3所示。可见,脉冲中心波长在1030 nm附近,光谱宽度约为30 nm,光谱呈现陡峭的两沿,为典型的展宽脉冲锁模在正色散域的输出光谱^[14]。

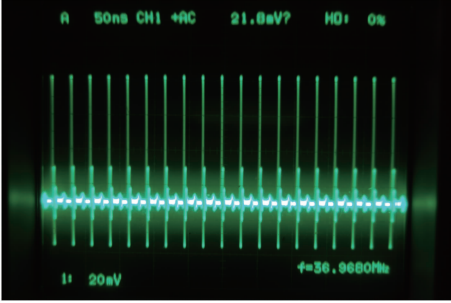


图2 示波器所示锁模脉冲序列

Fig. 2 Oscilloscope trace of the mode-locked pulse train

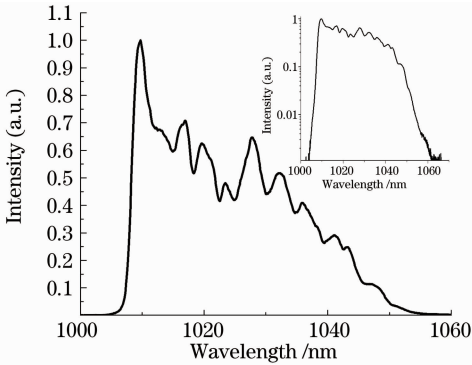


图3 脉冲光谱数据,插图为对数坐标系

Fig. 3 Pulse spectrum, the inset shows the corresponding spectrum on a logarithmic scale

同时还利用射频(RF)分析仪(Agilent 8560EC)对输出脉冲序列重复频率的一次谐波 RF 谱图进行了测量。由于脉冲序列重复频率一次谐波的信噪比体现了激光器的时间抖动噪声,所以以此作为激光器工作稳定性的指标之一^[15,16]。如图4所示,激光器输出脉冲序列的一次谐波信噪比为

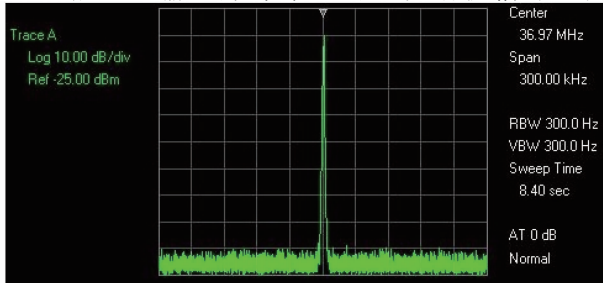


图4 输出脉冲的RF频谱图

Fig. 4 RF spectrum of the pulses

80 dB。实验过程中,激光器保持超过100 h的稳定运转,外界空气对流以及敲击光学平台均不会影响锁模质量,可见激光器抵抗环境干扰能力极佳。

利用自相关仪(APE PULSE CHECK)测量了脉冲时域宽度,如图5所示。自相关曲线为3.33 ps,假设脉冲形状为双曲正割型,则对应的激光脉宽为2.17 ps。输出激光脉冲经过腔外光栅压缩以后,测得自相关曲线为107 fs,对应双曲正割型脉宽为70 fs,非常接近于变换极限。结合实验装置图1对腔内动力学过程进行讨论。脉冲光在PBS输出前通过了较长的SMF传输,积累了大量正啁啾,然后脉冲光通过光栅对,精确设置后的光栅对提供的负色散补偿正好略小于SMF提供的正色散,从而脉冲光之前积累的正啁啾得到了补偿,使得脉冲光经过光栅对以后脉宽达到最窄,拥有极小的非线性相移以及正啁啾,再次通过SMF时候就不会积累过大的正啁啾而使脉冲过宽并压缩不回百飞秒以内^[17,18]。这也是此激光器比文献[7,14,15]所报道的激光器表现出的最大优点,即该激光器输出锁模脉冲序列包含了较大的线性啁啾,并且能够压缩到数十飞秒量级,这有利于利用输出脉冲进行CPA放大。

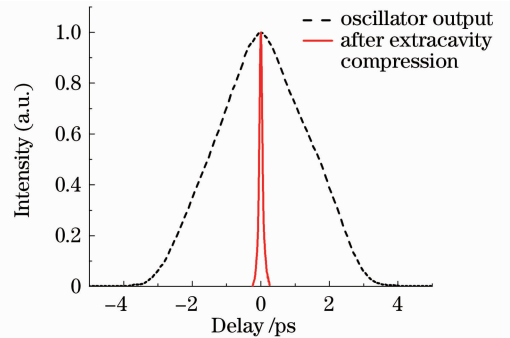


图5 激光器输出脉冲的自相关曲线

Fig. 5 Autocorrelation trace of the laser pulses

激光器在稳定锁模工作状态下的抽运功率与输出脉冲功率之间的关系如图6所示。在使激光器稳定锁模的最大抽运功率下,测量了输出功率,并逐渐降低抽运功率,直至锁模状态失稳。由图6可见,激光器输出斜效率达到40%。在36.97 MHz重复频率下,单脉冲运转最高输出功率67 mW,对应单脉冲能量1.81 nJ,峰值功率达到了25.9 kW。

4 结 论

利用NPR锁模在掺镱环形光纤激光器中得到了70 fs的超短脉冲输出,其脉冲序列重复频率为

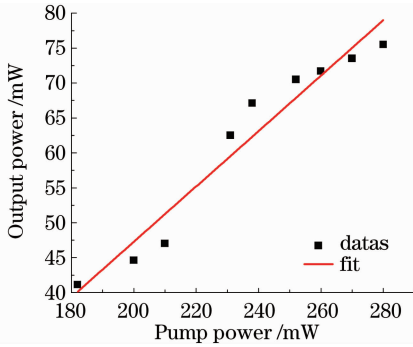


图 6 激光器的抽运-输出功率关系

Fig. 6 Pump-output power relation

36.97 MHz,中心波长为1030 nm,光谱宽度30 nm。在光路中,引入了光栅对作色散补偿,脉冲在光路循环中展宽与压缩,减低了脉冲传输过程中的非线性效应,使得脉冲能够携带更高的功率而不至于分裂。大部分光路限制在光纤中传输的结构,使得该激光器拥有极佳的环境稳定性与简单小巧的结构,有利于光学计量、测量等应用,也利于构造简化稳定的CPA放大系统。通过优化腔长,腔型结构,光栅间距等参数,能够产生不同种类的锁模状态,有望得到更短的脉冲宽度输出。

参 考 文 献

- 1 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1660~1670
胡明列, 宋有建, 刘博文等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1660~1670
- 2 Frank W. Wise, Andy Chong, William H. Renninger. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2008, **2**(1-2): 58~73
- 3 Zhong Yihui, Zhang Zuxing, 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 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 163~165

- 王旌, 张洪明, 张 隼等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器的研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 163~165
- 5 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 830~834
宋有建, 胡明列, 张 弛等. 呼吸脉冲锁模的光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 830~834
- 6 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 7 William H. Renninger, Andy Chong, Frank W. Wise. Giant-chirp oscillators for short-pulse fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(24): 3025~3027
- 8 Nikolai B. Chichkov, Christian Hapke, Katharina Hausmann *et al.*. 0.5 μ J pulses from a giant-chirp ytterbium fiber oscillator [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(4): 3647~3650
- 9 M. Hofer, M. E. Fermann, F. Haberl *et al.*. Mode-locking with cross-phase and self-phase modulation [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 502~504
- 10 Deng Yixin, Tu Chenghou, Lü Fuyun. Study of self-similar pulse nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3173~3178
邓一鑫, 涂成厚, 吕福云. 非线性偏振旋转锁模自相似脉冲光纤激光器的研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3173~3178
- 11 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
- 12 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
- 13 M. Hofer, M. E. Fermann, F. Haberl *et al.*. Mode locking with cross-phase and self-phase modulation [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 502~504
- 14 Andy Chong, William H. Renninger, Frank W. Wise. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(2): 140~148
- 15 H. A. Haus, A. Mecozzi. Noise of mode-locked lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(3): 983~996
- 16 Andreas Poppe, Liu Xu, F. Krausz *et al.*. Noise characterization of sub-10-fs Ti sapphire oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(2): 179~184
- 17 Zhang Wei, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Experimental study of figure-of-eight fiber lasers based on nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1808~1811
张 伟, 陈国夫, 赵 卫等. 非线性放大环形镜“8”字腔光纤激光器实验研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1808~1811
- 18 Zhao Hui, Chai Lu, Ouyang Chunmei *et al.*. A long-cavity a-normal-dispersion mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2010, **37**(12): 2958~2963
赵 慧, 柴 路, 欧阳春梅等. 长腔全正色散锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 2958~2963

栏目编辑:宋梅梅