

文章编号:1002-2082(2018)06-0916-05

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

于秀明¹,丁云飞²,陈俊达³,张欣梦³,马万卓³,孙志文³,姜子祺³,王天枢³

(1. 长春理工大学 光电信息学院电子工程分院, 吉林 长春 130114; 2. 长春理工大学 光电信息学院信息工程分院, 吉林 长春 130114; 3. 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要:设计并实验研究了一种结构简单的主动调制锁模高重复频率窄脉宽光纤激光器。采用窄线宽连续激光调制 4 GHz 高重频后,通过拉曼增益孤子压缩效应将脉宽由 27 ps 压窄至 2.6 ps。该高重频锁模激光泵浦一段 300 m 长高非线性光纤,同时脉冲被展宽至 7.4 ps。产生的超连续谱平坦度 20 dB 宽带可达 250 nm,功率波动为 ± 0.2 dB。

关键词:光纤激光器;主动锁模;高重复频率;窄脉宽;超连续谱

中图分类号:TN248

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0607001

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

Yu Xiuming¹, Ding Yunfei², Chen Junda³, Zhang Xinmeng³, Ma Wanzhuo³,
Sun Zhiwen³, Jiang Ziqi³, Wang Tianshu³

(1. School of Electronic Engineering, College of Optical and Electronical Information Changchun University of Science and Technology, Changchun 130114, China; 2. School of Information Engineering, College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130114, China; 3. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A simple high repetition-rate mode-locking fiber laser with narrow pulse width based on active modulation was designed and studied experimentally. A narrow linewidth continuous wave laser was modulated by a modulator with 4 GHz repetition-rate, and then, the pulse width can be narrowed to 2.6 ps from 27 ps by Raman gain soliton compression. The high repetition-rate mode-locking fiber laser was used to pump a 300 m long high nonlinear fiber, and the pulse width was extended to 7.4 ps. This supercontinuum (SC) has better flatness (a 250 nm SC spectrum can be observed at 20 dB) and higher stability (power fluctuation can be ± 0.2 dB).

Key words: fiber laser; active mode-locking; high repetition-rate; narrow pulse width; supercontinuum

引言

锁模光纤激光器具有转换效率高、能量高、散热性好、结构紧凑、价格低廉的优点,可以获得 ps 或 fs 量级的超短脉冲,可用于激光测量、医疗、军事等领域^[1-4],而具有高重复率的锁模光纤激光器在光通信

应用前景广阔^[5-6]。近年来,随着光纤激光技术的进步,高重复频率锁模光纤激光器研究得到了广泛重视,研究成果不断报道^[7-8]。锁模光纤激光器主要有被动锁模和主动锁模结构。被动锁模技术利用光纤非线性效应,受限于光纤激光器谐振腔长影响,无法

收稿日期:2018-08-16; 修回日期:2018-10-07

基金项目:国家自然科学基金(91338116)

作者简介:于秀明(1983—),女,吉林长春人,硕士,讲师,主要从事激光通信技术研究。E-mail:452701062@qq.com

通信作者:王天枢(1975—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,主要从事空间激光通信、光纤激光器研究。

E-mail: wangts@cust.edu.cn

采用超短腔获得较高重复频率, 只能采用提高泵浦源功率激发谐波锁模提高重频, 但受温度等因素影响, 稳定性较差^[9-12], 这就大大限制了锁模光纤激光在高速空间通信领域的应用。主动锁模技术利用激光主动调制实现高次谐波模式锁定, 其不受腔长影响, 稳定性高, 但其脉宽受调制信号影响, 往往很难实现被动锁模的窄脉宽。

本文提出一种通过激光外调制和脉冲压缩机制获得稳定的高重频锁模光纤激光器, 实验获得了重复频率 4 GHz 和脉宽 2.6 ps 的锁模激光。采用该高重频锁模光纤激光信号泵浦一段高非线性光纤, 获得了 250 nm 带宽平坦的超连续谱。

1 超短脉冲的产生和压缩

1.1 实验结构与原理

全光纤结构的高重频锁模激光器及其脉冲压缩结构如图 1 所示。采用一个窄线宽激光器 (NLL) 作为种子光源, 通过一个马赫-曾德调制器 (MZM) 后被反馈驱动调制成脉冲光源, 脉冲光经过掺铒光纤放大器 (EDFA1) 后, 平均功率得到提高, 再利用一个光纤隔离器 (ISO) 提高信噪比。窄线宽激光器采用 TERAXION PS-NLL 分布反馈 (DFB-LD) 半导体激光器, 其线宽为 50 kHz, 最大输出功率 100 mW, 波长漂移 $0.3 \text{ pm}/15 \text{ h}$ 、 $0.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。调制器采用 FUJITSU 铌酸锂电光外调制器, 工作波长 $1530 \text{ nm} \sim 1610 \text{ nm}$, 带宽可达 10 GHz, 半波电压 1.8 V, 消光比大于 20 dB, 插入损

耗小于 10 dB。EDFA 输入功率最高 10 dBm, 增益 20 dB, 噪声系数 4.5 dB。

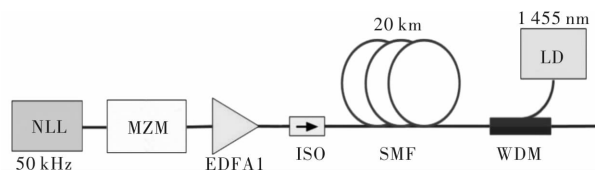


图 1 可调谐多波长掺铒光纤激光器结构

Fig. 1 Configuration of tunable multi-wavelength Ho^{3+} -doped fiber laser

NLL 功率采用 10 dBm, 经 EDFA 放大后锁模脉冲的平均功率为 100 mW, 再注入一个拉曼放大器结构, 该结构采用 1455 nm 激光二极管通过一个 $1455/1550 \text{ nm}$ 波分复用器 (WDM) 反向泵浦一段 20 km 长单模光纤, 拉曼泵浦光功率 1 W。通过拉曼放大器, 可形成拉曼增益孤子压缩效应, 从而将脉宽压缩。

1.2 实验结果与分析

采用一个 4 GHz 信号源经射频放大器后驱动电光调制器, 将窄线宽激光调制成 4 GHz 重复频率的锁模脉冲激光, 脉宽 27 ps, 如图 2 所示。调制后的锁模脉冲激光经 EDFA 放大至 100 mW, 再注入光纤拉曼放大器。光纤拉曼放大器采用 20 km 单模光纤, 其色散系数为 $18 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ @ 1550 nm 。在合适的偏置点, MZM 会利用每个光脉冲自身的强度曲线来进行调制, 从而形成脉冲功率相关的窗口效应。偏置在正交偏置点, 反馈驱动调制的 MZM 传输曲线可表示为

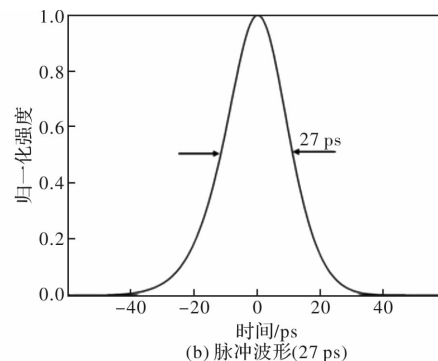
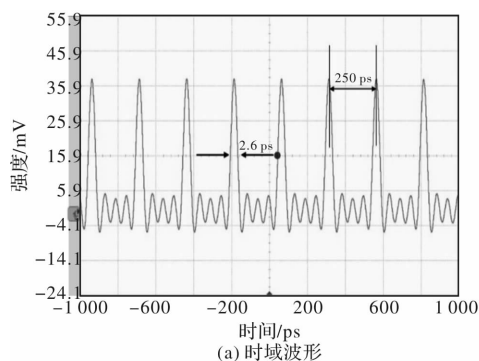


图 2 重复频率 4 GHz 的调制激光脉冲波形

Fig. 2 Modulated laser pulse waveform with 4 GHz repetition-rate

$$T = \frac{1}{2} \{1 + \sin[\frac{\pi}{V_{\pi}} (V_{\text{RF}} \pm V_{\text{PIFF}})]\} \quad (1)$$

式中: V_{π} 为 MZM 的半波电压; V_{RF} 和 V_{PIFF} 分别为 RF 正弦波信号和脉冲前馈信号的电压, 同时驱动

MZM 的不同端口, 可以表示为

$$V_{\text{RF}} = A \cos(2\pi ft) V_{\text{PIFF}} = Bp(t) \quad (2)$$

式中: f 为调制频率; $p(t)$ 为光探测器 (PD) 探测到的脉冲强度; A 和 B 分别为 RF 信号和前馈信号的

强度。

由于拉曼增益孤子压缩效应使信号脉宽进一步压窄至 2.6 ps,如图 3 所示。采用高速实时示波器(DPO, Tektronix 72004C)观测,其带宽为 20 GHz,实时采样率 100 GS/s。从图中可知,通过拉曼增益孤子压缩机制,脉宽被压缩 1 个数量级,3 dB 光谱宽度 0.05 nm,平均功率约为 60 mW。

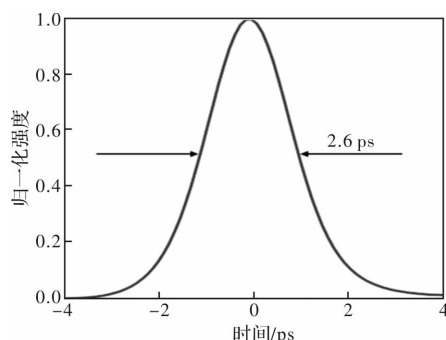


图 3 压缩后的脉冲

Fig. 3 Laser pulse waveform after compressing

2 超连续谱

2.1 结构与原理

采用获得 4 GHz 高重复窄脉宽锁模光纤激光信号作为泵浦源,研究了高非线性光纤产生超连续谱的问题。实验结构如图 4 所示,采用实验中获得的 2.6 ps 脉宽 4 GHz 高重复锁模激光,经一个掺铒光纤放大器(EDFA2)放大后,经大功率光纤隔离器注入 300 m 长高非线性光纤中,获得宽带超连续谱。

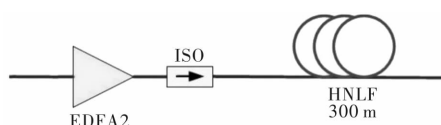


图 4 超连续产生实验结构

Fig. 4 Supercontinuum generation experiment structure

该实验中,产生超连续谱在光纤的正常色散区,利用脉冲的自相位调制效应展谱,描述单模光纤内脉冲演化的广义非线性薛定谔方程为

$$\frac{dA(z,t)}{dz} + \frac{a(\omega)}{2}A - \sum_{k \geq 1} i^{k+1} \frac{b_k}{k!} \frac{\partial^k A}{\partial t^k} = ig(\omega)(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{d}{dt})[A(z,t) \int_{-\infty}^{\infty} dt' r(t') |A(z,t-t')|^2] \quad (3)$$

式中: $A(z,t)$ 为慢变包络近似; z 为距离; ω 为角频率; $a(\omega)$ 为衰减系数; b_k 表示各阶色散; $R(t)$ 为非线性响应函数:

$$R(t) = (1 - f_R)d(t) + f_R h_R(t) \quad (4)$$

式中: $f_R = 0.18$,表示延迟拉曼响应对总的非线性极化的贡献; $h_R(t)$ 为拉曼响应函数; $G(\omega)$ 为非线性系数:

$$g(\omega) = \frac{n_2 \omega_0}{c S_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{S_{\text{eff}}} \quad (5)$$

对于窄于 5 ps,但又包含多个光学周期的足够宽脉冲(脉宽远大于 10 fs),可以利用 Taylor 级数展开:

$$|A(z,t-t')|^2 \approx |A(z,t)|^2 - t' \left(\frac{d}{dt} \right) |A(z,t)|^2 \quad (6)$$

则(3)式可近似为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{a(\omega)}{2}A + \left[\sum_{n \geq 2} b_n(\omega) \frac{i^{n-1}}{n!} \frac{\partial^n}{\partial T^n} \right] A = ig(\omega) \times \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial (|A|^2 A)}{\partial T} - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right] \quad (7)$$

式中: T 为以群速度移动的参考系中的时间坐标;(7)式左边表示线性效应,右边表示非线性效应; T_R 为相应的拉曼响应时间参数,与拉曼增益的斜率有关。

2.2 实验结果与分析

经光纤放大器放大后,泵浦脉冲的平均功率可达 1 W。高非线性光纤的数值孔径为 0.35,传输损耗小于 1.5 dB/km,截止波长 1 480 nm,色散系数为 0 ps/nm · km@1 550 nm,非线性系数为

10 W⁻¹km⁻¹。采用光谱分析仪(OSA, Yokogawa AQ6375D)观测的信号光谱变化如图 3 所示,产生的超连续光谱宽度约为 250 nm(20 dB),如图 5 所示,图中 1 550 nm 处为泵浦激光,线宽较窄,功率波动为 0.2 dB。

随着超连续谱展宽,其脉冲宽度受到一定影响,经过 300 m 非线性光纤产生了时域脉冲展宽,如图 6 所示。通过超连续谱展宽过程,脉冲宽度被展宽至 7.4 ps。

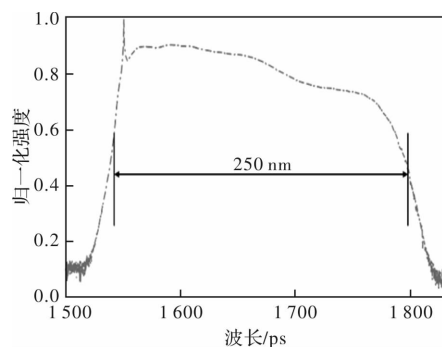


图5 超连续谱

Fig. 5 Supercontinuum

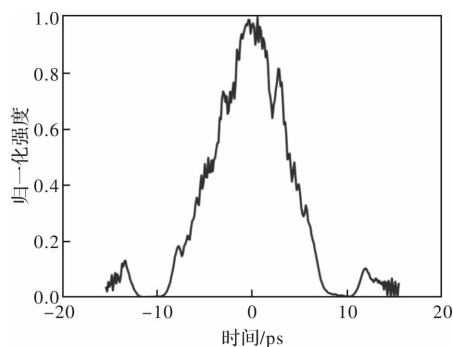


图6 经过超连续谱展宽的脉冲

Fig. 6 Laser pulse after supercontinuum broadening

3 结束语

本文提出并实验研究了一种采用外调制器调制的主动锁模超快光纤激光器,重复频率可达4 GHz,通过拉曼增益孤子压缩效应将脉宽压窄1个数量级,达2.6 ps。通过压缩后的高重复频率锁模激光泵浦一段300 m长高非线性光纤,产生了250 nm (20 dB)带宽超连续谱。该结构简单,锁模脉冲稳定性好,超连续谱平坦。高重复频率锁模激光由于其部分相干及窄脉宽特性,可望用于高速空间激光通信及时分复用高速光通信技术。

参考文献:

- [1] ZHANG Zhigang. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2011,31(9): 0900130.
张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J]. 光学学报, 2011,31(9): 0900130.
- [2] LI Jing, DAI Yongheng, ZHANG Zhigang. High repetition-rate passively mode-locking Er-doped fiber laser[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(1): 66-68.

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.

- [3] QIN Peng, CHEN Wei, SONG Youjian, et al. Long range absolute distance measurement based on femto-second laser balanced optical cross-correlation[J]. Acta Phys. Sin., 2012, 61(24): 240601.
秦鹏,陈伟,宋有建,等. 基于飞秒激光平衡光学互相关的任意长绝对距离测量[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 240601.
- [4] LUO Jiang, YANG Song, HAO Qiang, et al. Precise locking the repetition rate of a SESAM mode-locking all polarization maintaining fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206003.
罗浆,杨松,郝强,等. SESAM锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定[J]. 光学学报, 37(2): 0206003 (2017)
- [5] DOU Zhiyuan, TIAN Jinrong, LI Kexuan, et al. High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser[J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(6): 064206.
窦志远,田金荣,李克轩,等. 高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器[J]. 物理学报, 2015, 64(6): 064206.
- [6] ZHANG Xinmeng, WANG Tianshu, CHEN Junda, et al. Scintillation index reducing based on wide-spectral mode-locking fiber laser carriers in a simulated atmospheric turbulent channel[J]. Optics Letters, 2018,43(14): 3421-3424.
- [7] WANG Tianshu, MA Wanzhuo, JIA Qingsong, et al. Passively mode-locked fiber lasers based on nonlinearity at 2- μ m band[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1102011.
- [8] JIA Qingsong, WANG Tianshu, MA Wanzhuo, et al. Mode-locking thulium-doped fiber laser with 1.78-GHz repetition rate based on combination of nonlinear polarization rotation and semiconductor saturable absorber mirror[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1502808.
- [9] HE Guanglong, XU Li, JIN Liang, et al. Double SESAM passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(5): 0505002.
何广龙,徐莉,金亮,等. 双SESAM被动锁模超短脉冲光纤激光器,红外与激光工程, 2018, 47(5): 0505002.
- [10] LIU Peng, WANG Tianshu, ZHANG Peng, et al.

- Multi-wavelength thulium-doped mode-locking fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Acta Photonica Sinica, 2016,45(6):0614003.
- 刘鹏,王天枢,张鹏,等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铥锁模光纤激光器[J]. 光子学报,2016,45(6):0614003.
- [11] JIA Qingsong, WANG Tianshu, MA Wanzhuo, et al. Passively harmonic mode-locked pulses in thulium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Optical Engineering, 2016,55(10): 106121.
- [12] XU Chengyang, JIN Liang, CHEN Hualong, et al. Narrow linewidth picosecond pulsed fiber lasers based on WS_2 saturable absorber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018,45(1): 0101007.
- 徐成阳,金亮,陈华龙,等. 基于 WS_2 可饱和吸收体的窄线宽皮秒脉冲光纤激光器[J]. 中国激光,2018,45(1): 0101007.