

文章编号: 0258-7025(2009)01-0092-04

基于被动锁模光纤激光器的光子超宽带脉冲源

赵 羽¹ 赵德双² 刘永智¹ 黄 琳¹

(电子科技大学¹光电信息学院, ²物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要 超宽带(UWB)无线通信的关键技术之一是 UWB 窄脉冲产生技术。为简化光子超宽带脉冲源的设计,提出采用基于光纤可饱和吸收体效应的环形腔被动锁模光纤激光器来设计光子 UWB 脉冲源。为了获得满足 UWB 室内无线通信频谱范围的脉冲,利用色散和啁啾效应展宽脉宽的原理,在激光器环形腔内使用较长的增益光纤引入大量色散效应,将光脉冲展宽以符合美国通信委员会(FCC)规定的室内 UWB 通信频谱范围(3.1~10.6 GHz)。并根据光纤激光器谐波锁模的原理,通过控制偏振态调制输出脉冲的周期以提高脉冲重复频率。实验中,展宽的光脉冲经光电转换器转换成 UWB 电脉冲序列后,由宽带数字示波器进行波形观测和测量。通过调节偏振控制器,获得了可输出 8 种不同脉冲重复频率的光子超宽带脉冲源。

关键词 激光器;光纤激光器;超宽带技术;群速度色散;自相位调制;脉宽;被动谐波锁模

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0092

Photonic Generation of Ultra-Wideband Signal Using a Passively Mode-Locked Fiber Laser

Zhao Yu¹ Zhao Deshuang² Liu Yongzhi¹ Huang Lin¹

(¹School of Optoelectronic Information, ²School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Narrow pulse generation is one of the key technologies of ultra-wideband (UWB) radio wave communication. To simplify the photonic generation of UWB signal, a novel method for UWB microwave signal generation using a passively mode-locked fiber laser is proposed and demonstrated. Er³⁺-doped fiber as long as 3 m is used to get enough dispersion for achieving the wider pulse width, so that the frequency range of the pulse is between 3.1 and 10.6 GHz, as defined by FCC (US Federal Communications Commission). Based on the principle of harmonic mode-locking, the polarization is adjusted to get different periods of pulse so that the repetition rate is increased. In the experiments, the UWB signal is generated by beating the modes of passively mode-locked fiber ring laser at a wideband photo detector. A wideband numerical oscillograph is used to observe the wider pulse. The UWB photonic source with 8 different repetition rate outputs is gotten by adjusting the polarization controller.

Key words lasers; fiber laser; ultra-wideband technology; group velocity dispersion; self phase modulation; pulse width; passive harmonic mode-locking

1 引 言

超宽带(UWB)技术具有带宽极宽、系统容量很大、适合于高速率无线传输、抗窄带干扰能力和时间分辨能力强、与窄带系统共存性和安全保密性好等优势^[1~5],成为无线通信领域研究、开发的一个热

点。UWB无线通信的关键技术之一是 UWB 窄脉冲产生技术,其中基于电子半导体器件的 UWB 脉冲产生方法的研究较多^[6,7]。由于基于光纤和光电调制的窄脉冲产生技术具有脉冲窄、不受电磁干扰等优势,而成为 UWB 脉冲源的研究热点^[1~5,8,9]。

收稿日期:2008-01-22;收到修改稿日期:2008-05-07

基金项目:国家自然科学基金(60736038),国家 863 计划(2007AA01Z269)和国防预研基金(9140A02040106DZ0222)资助项目。

作者简介:赵 羽(1981—),男,博士研究生,主要从事脉冲光纤激光器及其应用的研究。E-mail:yuzhao@uestc.edu.cn

导师简介:刘永智(1942—),男,教授,博士生导师,目前研究方向为光纤激光器、光纤传感与光信息处理。

E-mail:yzliu123@uestc.edu.cn

已有基于光纤主动有理数谐波锁模^[2]、光纤布拉格光栅^[3]、光纤交叉相位调制^[4]和高速电光调制^[8]等方式获得超宽带光子脉冲源的实验研究报道。但这些技术都同时需要高速电光调制器以及高速射频(RF)调制信号,使得系统结构较复杂,成本较高。我国目前主要以理论和仿真研究为主,实验研究还比较少^[10,11]。

环形腔被动锁模光纤激光器继承了光纤激光器低阈值、低噪声、高效率、可调谐、高性价比和光束质量较好等优点^[12~14],基于可饱和吸收体效应^[15],不需要使用高速调制器和腔外调制信号就能够实现飞秒脉冲输出。本文利用色散展宽原理,将被动锁模光纤激光器的飞秒脉冲展宽为皮秒量级以满足 UWB 室内无线通信的频谱范围,并根据光纤激光器谐波锁模的原理调制脉冲周期以提高脉冲重复频率,进行了光子超宽带脉冲源的实验研究。

2 实验装置与原理

光子超宽带脉冲源实验装置如图 1 所示。环形腔被动锁模光纤激光器在 980 nm 激光的抽运下,通过偏振调制产生超宽带光脉冲信号。光脉冲经宽带光电转换器可转换为 UWB 电脉冲信号,然后由示波器进行脉冲检测。

2.1 被动锁模光纤激光器

被动锁模光纤激光器主要用来产生 UWB 光脉冲。图 1 中的光脉冲源为环形腔被动谐波锁模光纤激光器,其腔体主要由作为增益介质的高掺杂浓度掺 Er³⁺ 光纤、起偏激光的光纤在线起偏器、保证激光单向传输的光纤隔离器(ISO)、调整腔内偏振态的 2 个光纤偏振控制器 PC1 和 PC2 以及 980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)和耦合输出器组成。其主要特点是不需要使用高速调制器就能够实现超短脉冲输出,结构简单,成本较低,产生的光脉冲较稳定。

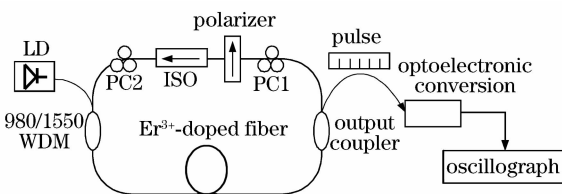


图 1 光子超宽带脉冲源实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of photonic generation of UWB signal

其原理是在光纤的反常色散区(色散系数 $\beta_2 <$

0),群速度色散(GVD)效应会导致光脉冲的较高的频率分量(蓝移)比较低的频率分量(红移)传输得快;而自相位调制(SPM)导致的频率啁啾会使蓝移比红移传输得慢(二者都不会影响脉冲的形状)。二者的综合作用对光脉冲脉宽(T_1)的影响可以表示为^[16]

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 T_0 为初始脉宽, C 为啁啾参量, β_2 为 GVD 参量, z 为脉冲传输的距离。从方程(1)可以看出,若 $\beta_2 C > 0$, 脉冲单调展宽;若 $\beta_2 C < 0$, 会产生脉冲窄化效应,此时激光器能输出飞秒量级的脉冲。但飞秒量级的脉宽对应的频谱宽度在太赫兹的量级上,不适用于美国通信委员会(FCC)规定的室内 UWB 通信频谱范围(3.1~10.6 GHz)^[9]。为此,在激光器环形腔内使用了长达 3 m 的高掺杂浓度掺 Er³⁺ 光纤(EDF),以引入较大的色散效应,使得整个腔体处在正常色散区($\beta_2 C > 0$),达到展宽光脉冲脉宽的目的。同时,3 m 长的高浓度 EDF 带来的增益将增强脉冲的峰值功率,与脉冲光强相关的非线性效应的影响随之增大,这主要表现在由 SPM 引起的频率啁啾效应和非线性相移的增强。此频率啁啾效应和群速度色散效应的综合作用将导致光脉冲的蓝光分量比红光分量传输得慢,使脉宽单调展宽。当脉冲被展宽到皮秒量级后,高阶色散和非线性效应可以忽略不计^[16]。

根据(1)式可模拟出掺铒光纤中展宽因子 T_1/T_0 随传输距离的变化情况。设入射光脉冲脉宽为 100 fs, 经过 3 m 的高掺杂光纤,脉冲被展宽了约 600 倍,即 60 ps。考虑到熔接点、隔离器、耦合输出等因素的影响,最后输出脉冲的宽度应在百皮秒的量级。经测试,图 1 所示的实验系统输出脉宽为几百皮秒,对应的频谱宽度在 10 GHz 的量级,满足了 FCC 的规定。需要注意的是,引入 3 m 长的高浓度掺杂光纤还会增加自发辐射噪声,一定程度上降低抽运效率,但考虑到展宽脉宽的效果,这个结果是可以接受的。

通常情况下,被动锁模光纤激光器处于基阶锁模状态,其周期都较大(如本文的周期为 68 ns),重复频率较低。基于光纤激光器高阶被动谐波锁模的原理,通过仔细调节偏振控制器,获得了 21 阶谐波锁模(周期为 3.2 ns)的光脉冲序列,大大提高了脉冲的重复频率。

2.2 宽带光电转换和脉冲检测

图 1 中的光电转换器主要由中国电子科技集团公司第 44 研究所的超高速光电探测器以及自制的高速反向偏置电路构成,光电探测器采用 InGaAs PIN 结构,在 1550 nm 的响应度为 0.80 A/W, 3 dB 带宽 10 GHz, 响应时间小于 100 ps。光纤激光器产生的光脉冲输入宽带光电转换器即可被转换为 UWB 电脉冲信号。然后用示波器观测波形,示波器为 LeCroy 的 SDA3000 数字示波器,模拟输入带宽 3 GHz, 实时采样率 20 GS/s。

3 实验结果与分析

搭建好如图 1 所示的实验系统后,仔细调节光纤激光器腔内的偏振态可达到激光器模式锁定,获得了中心波长为 1560 nm 类高斯脉冲激光输出。光谱的 3 dB 带宽达 25 nm, 根据傅里叶变换极限估计,其半峰全宽(FWHM)小于 200 fs。图 2 为光纤激光器处于基阶锁模状态时测得的脉冲序列,此时脉冲为类高斯波形,周期约为 68 ns, 对应重复频率为 14.7 MHz, 脉冲半峰全宽约 800 ps。可见,通过较长的高掺杂浓度掺 Er^{3+} 光纤成功地引入了色散和啁啾效应, 展宽了脉宽。

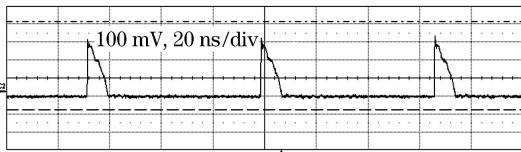


图 2 基阶锁模光纤激光器输出脉冲

Fig. 2 Output pulses of fundamental mode-locked fiber laser

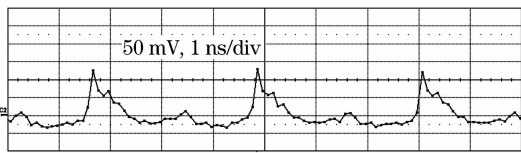


图 3 21 阶谐波锁模光纤激光器输出脉冲

Fig. 3 Output pulses of 21st harmonic mode-locked fiber laser

图 3 为处于 21 阶被动谐波锁模状态的光纤激光器产生的脉冲序列,此时脉冲为类高斯波形,脉宽约 200 ps, 周期为 3.2 ns, 对应重复频率为 312.5 MHz。这是通过仔细调节光纤激光器环形腔内的偏振态获得的,可见通过偏振调制成功获得了被动锁模光纤激光器的谐波锁模状态,大大压缩了输出脉冲的周期,提高了重复频率。除偏振调制技术外,还可结合抽运功率的调整获得稳定的被动谐

波锁模光脉冲输出。

进一步仔细调整偏振控制器,获得了介于基阶的 3.2 ns 和 21 阶的 68 ns 之间的 6 种周期,分别为 4.5 ns, 4.7 ns, 6.1 ns, 7.5 ns, 9.6 ns, 13.5 ns, 即此基于被动谐波锁模的超宽带光子脉冲源有 8 种可控的重复频率输出。若能加入更高的抽运功率,或者采用多路抽运,应该可以调出更高阶的谐波锁模状态,获得更多种周期的脉冲和更高的重复频率。

另外,这种结构的光纤激光器不需要使用高速调制器和腔外调制信号,简化了光纤环形腔的结构,增加了工作稳定性。在室温环境下,测试了此 UWB 脉冲源在连续 5 h 锁模状态下的输出特性,并每隔 8 h, 24 h 和 48 h 再次测试。20 次重复测试表明,在早晚温度变化(约 10 °C),工作平台搬动等情况下,其脉冲幅值有 5% 左右的波动,光谱谱宽有约 2% 的波动,脉冲形状和重复频率保持得很好,未出现失锁或中心波长漂移的现象。

4 结 论

利用环形腔被动锁模光纤激光器产生窄脉冲,并在激光器环形腔内使用了长达 3 m 的高掺杂浓度掺 Er^{3+} 光纤以引入较大的色散和啁啾效应,将激光器的飞秒脉冲展宽为皮秒量级,在不需要使用高速调制器和腔外调制信号的情况下,获得了符合 FCC 室内 UWB 无线传输规定的光子超宽带脉冲源,简化了光纤环形腔的结构。并通过调节偏振控制器,在光纤激光器的基阶锁模状态下分别探测到 8 种不同重复频率的脉冲。这种可控的重复频率调制对 UWB 通信具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 A. Aszubowska-Anandarajah, L. P. Barry. UWB system based on gain-switched laser [C]. *Microwave Photonics*, 2006 MWP '06. *International Topical Meeting*, 2006. 1~4
- 2 Zhichao Deng, Jianping Yao. Photonic generation of microwave signal using a rational harmonic mode-locked fiber ring laser [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2):763~765
- 3 Fei Zeng, Jianping Yao. Ultrawideband impulse radio signal generation using a high-speed electrooptic phase modulator and a fiber-Bragg-grating-based frequency discriminator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(19):2062~2065
- 4 Fei Zeng, Jianping Yao. An approach to ultrawideband pulse generation and distribution over optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(7):823~825
- 5 A. Saeed, Sabira Khatun, Borhanuddin Mohd *et al.* Ultrawideband interference mitigation using cross-layer cognitive radio [C]. *IEEE Wireless and Optical Communications Networks*, 2006 IFIP International Conference 2006. 5

- 6 Y. Jeong, S. Jung, J. Liu. A CMOS impulse generator for UWB wireless communication systems [C]. *Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2004. VI-129
- 7 H. Kim, D. Park, Y. Joo. All-digital low-power CMOS pulse generator for UWB system [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**: 1534~1535
- 8 Q. Wang, J. Yao. UWB doublet generation using nonlinearly biased electro-optic intensity modulator [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(22):1304~1305
- 9 M. Z. Win, R. A. Scholtz. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2000, **48** (4):679~689
- 10 Hongwei Chen, Minghua Chen, Ciyuan Qiu *et al.*. A novel composite method for ultra-wideband doublet pulses generation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(24):2021~2023
- 11 Fan Xiangning, Bi Guangguo. Researchs on Key Techniques of Ultra Wideband (UWB) Wireless Communication Systems [D]. Ph. D. dissertation, Southeast University, 2005. 70~76
樊祥宁, 毕光国. 超宽带无线通信关键技术研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2005. 70~76
- 12 Liu Yang, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):883~894
- 刘艳格, 冯新焕, 董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):883~894
- 13 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):50~54
张欣, 陈伟, 刘宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):50~54
- 14 Xia Jiangzhen, Cai Haiwen, Ren Hong *et al.*. Study on output characteristics of erbium-doped fiber ring lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7):823~827
夏江珍, 蔡海文, 任虹等. 掺铒光纤环形激光器输出特性的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7):823~827
- 15 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, 张璠等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):163~165
- 16 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 42~46, 414~431
Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 42~46, 414~431

《中国激光》“激光医学与生物光子学”专题征稿启事

光学技术特别是激光技术的快速发展给生物医学成像、传感以及诊断学领域带来了重大变革,并产生了巨大影响。激光医学与生物光子学作为一门新兴的交叉性学科,为生物医学的应用发展及基础理论研究提供了有利的条件。它结合多个学科,探索光子学技术在生物研究及医学诊断与治疗中的应用,已成为国际上迅速发展的领域并取得了诸多令人兴奋的成就。《中国激光》计划于2009年9月正刊上推出“激光医学与生物光子学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“激光医学与生物光子学”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域基础理论的研究进展以及最先进的临床试验水平。

征稿范围包括:

- 激光医学与生物光子学的基础研究
- 激光治疗
- 生物光学成像技术
- 非侵入性光学诊断
- 生物光学传感技术
- 生物光学器件
- 光动力学疗法
- 其他

截稿日期:2009年6月30日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“激光医学与生物光子学”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“激光医学与生物光子学”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部