

脉宽可调谐方波脉冲掺铒光纤激光器

张鹏程,李 陈,胡伟翔,张祖兴*

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院,南京 210023)

摘要:为分析方波脉冲的激光输出特性,提出了利用色散傅里叶变换的方法对脉宽可调谐方波脉冲掺铒光纤激光器进行实验研究,采用非线性放大环锁模方式得到了重复频率为 1.51 MHz 方波锁模脉冲。实验分析得出:随着泵浦功率的增大,方波脉冲的持续时间持续增大,其对应的单次光谱线宽线性增大;光谱的 15 次往返在波长 1586.10 nm 处具有几乎相同的强度,说明该激光器具有良好的稳定性。

关键词:光纤激光器;方波脉冲;色散傅里叶变换;超快实时测量

中图分类号:TN365 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)10-0029-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.10.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Square-wave pulse Erbium-doped fiber laser with tunable pulse duration

ZHANG Pengcheng, LI Chen, HU Weixiang, ZHANG Zuxing*

(Advanced Photonic Technology Laboratory, College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210023, China)

Abstract: In order to analyze the laser output characteristic of square wave pulse, a method of dispersion Fourier transform is proposed for the experimental study of square wave fiber laser with tunable pulse duration. Using a locking mode of nonlinear amplifying loop mirror, the square pulse with 1.51 MHz repetition rate is obtained. Experimental analysis shows that with the increase of pump power, the pulse duration of square pulses can increase continuously and the corresponding single spectral line width increases linearly. The spectra with central wavelength 1581.10 nm within 15 round trips have almost the same intensity, which further indicates that the laser has good stability.

Key words: fiber laser; square-wave pulse; dispersion Fourier transform; fast real-time measurement

0 引言

利用光纤激光器产生的纳秒方波脉冲,因其独特的时域和频域特性,在光学传感、光纤通信、生物医疗、激光显示和非线性光学等领域有着重要的应用前景。1991 年,Richardson 等人^[1]在实验上首次从利用非

线性光纤放大环镜(NALM)作为等效锁模元器件的锁模光纤激光器中观察到方波脉冲产生。次年,Matsas 等人^[2]利用非线性偏振旋转(NPR)结构同样从锁模光纤激光器得到了纳秒方波脉冲。2011 年,陈国良等人^[3]在数值上分析了在 8 字腔方波脉冲激光器中方波脉冲的宽度可随 NALM 的长度增加而变宽。2014 年,Mei 等人^[4]提出了在 8 字腔中利用 NALM 锁模,获得脉冲宽度和幅度可调的方波脉冲。2015 年,Liu 等人^[5]在大反常色散掺铒光纤激光器中发现了稳定的类噪声方波锁模脉冲,其脉冲宽度在 300 ns 内可调。2018 年,MA 等人^[6]利用调 Q 锁模获得了耗散孤子方波脉冲。

近年来,基于色散傅里叶变换(DFT)的新型测量技术以能够实现高速瞬态测量而备受关注。DFT 是利用色度色散在时间上对信号进行无失真地拉伸,降低带宽,使其能够被光电探测器所探测。每个脉冲被拉

收稿日期:2019-03-28。

基金项目:国家级大学生创新训练计划项目资助(SZDG2018013)资助;南京邮电大学人才引进项目(NY215002)资助;江苏省自然科学基金(BK20161521)资助。

作者简介:张鹏程(1998-),江苏南通人,男,光电信息科学与工程专业本科生,就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院,主持国家级大学生创新训练计划项目,主要从事锁模光纤激光器、非线性光学和光纤传感等方面的研究。

* 通信作者:张祖兴(E-mail: zxzhang@njupt.edu.cn)。



伸后所得到的时域波形与光谱形状是一致的,即将激光输出的光谱映射在实时示波器上直接读出的是时间波形。它克服了传统光谱分析仪速度的限制,色散拉伸后的时域波形可以表示脉冲波形的光谱强度,能够形象地展示原来的光谱信息,实现快速单次光谱^[7]测量来捕捉动态过程。而这一过程对分析激光器的往返光谱的演化具有重要的意义,有助于分析激光器的稳定性、周期性和振荡等特性。

本文利用 DFT 的测量技术,研究脉宽可调谐方波脉冲光纤激光器的光谱动力学现象。

1 实验结构及原理

本文所搭建的双泵浦 8 字腔脉宽可调谐方波脉冲光纤激光器实验装置示意图如图 1 所示。它由 2 个环路组成,即左单向环和右双向环,2 个环路通过 50:50 耦合器(OC1)连接。右双向环由 980 nm 的激光二极管(LD2)、1 m 掺铒光纤(EDF)、偏振控制器(PC2)和 130 m 单模光纤(SMF)等光器件组成,构成 NALM。NALM 的作用与构成等效可饱和吸收体类似,实现被动锁模获得超短脉冲。130 m SMF 用于增加 NALM 中顺时针传播光和逆时针传播光之间的非线性相移。左单向环包含 LD1、1 m EDF、PC1、耦合比为 50:50 的 OC2 和偏振不相关隔离器(PI-ISO)。PI-ISO 用于实现左环光波的单向传输,PC2 用于实现激光输出。为了利用 DFT 技术实现波长-时间的映射,在示波器和激光输出之间放置一段色散补偿光纤(DCF)。时间平均频谱和实时时间测量分别用光谱分析仪(OSA)和高速实时示波器(OSC,采样率为 20 GSa/s)来测量,DFT 通过在 8.8 km 长的 DCF 中以 $-44 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的色散在时间上拉伸方波脉冲来实现。

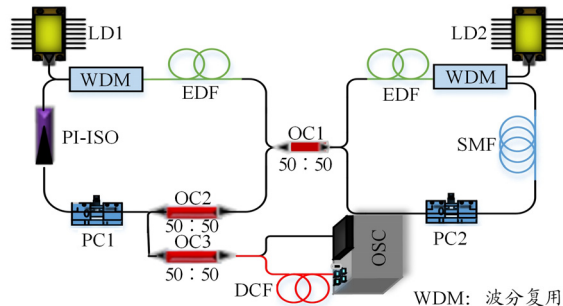


图 1 方波脉冲光纤激光器实验结构示意图

2 实验结果与讨论

在光纤激光器中,通过调节 2 个 PC 来改变光波的偏振态以获得方波脉冲。当 LD1 和 LD2 的泵浦功率

分别为 421 mW 和 315 mW 时的典型方波脉冲输出特性如图 2 所示。图 2(a)表示方波脉冲的光谱图,中心波长为 1586.18 nm (OSA 的分辨率为 0.02 nm), 3 dB 光谱带宽为 2.53 nm;图 2(b)表示单脉冲的持续时间为 6.89 ns;图 2(c)表示了被动锁模光纤激光器的输出脉冲序列,脉冲的周期为 0.66 μs ;实验中测量的方波脉冲的射频谱如图 2(d)所示,脉冲序列的重复频率为 1.51 MHz。

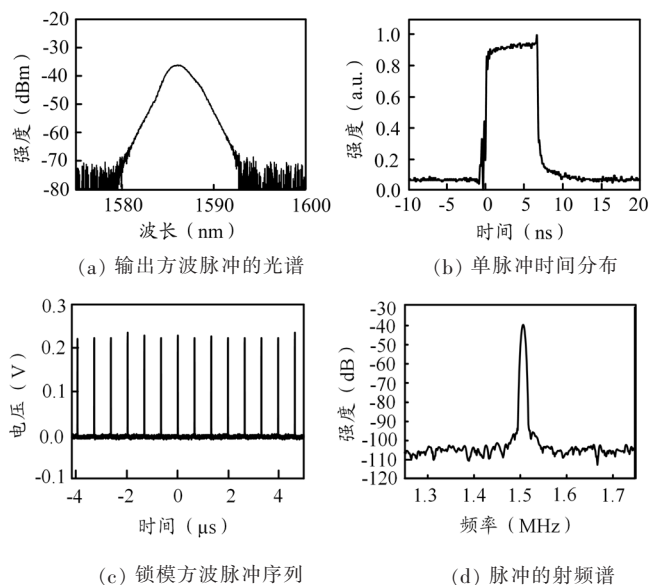


图 2 激光器在 LD2 泵浦功率为 315 mW 时得到的方波脉冲输出特性

当 LD1 泵浦功率设置在 421 mW 时,实验研究了方波脉冲的持续时间随 LD2 泵浦功率的变化情况,结果如图 3 所示。实验结果表明:随 LD2 泵浦功率的增大,方波脉冲的持续时间不断增大。当 LD2 泵浦功率分别为 240 mW、255 mW、270 mW、285 mW、300 mW 和 315 mW 时,相应的脉冲持续时间分别为 5.27 ns、5.55 ns、5.89 ns、6.23 ns、6.57 ns 和 6.89 ns。

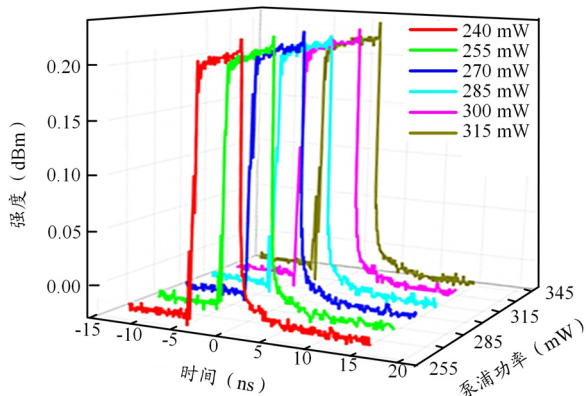


图 3 方波脉冲的持续时间随 LD2 泵浦功率的变化

方波脉冲的产生是由于NALM内峰值功率的钳制效应所致。在NALM内存在强度相同、传输方向相反的2束光,由于交叉相位调制和自相位调制等非线性效应的作用,光在NALM中往返一次会产生非对称的非线性相移。输入功率和NALM中的增益决定了NALM中非线性透射率的大小。NALM中的固定增益部分存在输入功率稳定的功率区域,光在腔内往返,在稳定的功率区域中输出功率被钳位到稳定的功率点,而在稳定功率区域外的功率被逐渐抑制到零,最终形成方波脉冲。

实验还研究了锁模脉冲实时光谱的演化图,如图4所示。保持LD1泵浦功率为421 mW不变,改变LD2的泵浦功率分别为240 mW、255 mW、270 mW、285 mW、300 mW和315 mW时,测得相应方波脉冲光谱的3 dB带宽分别为5.67 nm、5.92 nm、6.16 nm、6.43 nm、6.69 nm和6.95 nm。

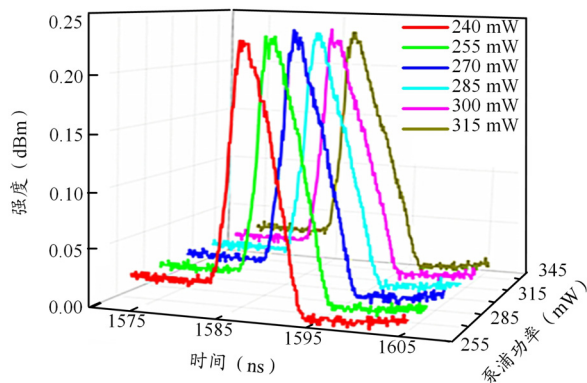


图4 方波脉冲实时光谱的演化图

方波脉冲持续时间与光谱3 dB带宽随LD2泵浦功率的变化如图5所示。可以看出,方波脉冲映射光谱的3 dB带宽随LD2的泵浦功率线性变化,但在OSA上观察脉冲光谱却无明显变化,这也进一步表明DFT测量技术的优越性;脉冲的持续时间随LD2的泵浦功率线性变化,且脉冲的幅度保持不变,即峰值功率保持不变。由于传统光谱分析仪测量的是激光腔内脉冲多次循环的平均光谱,无法探测到光谱的实时变化。为了验证激光器输出的是真正的方波脉冲,而不是类噪声脉冲,我们采用DFT方法测量其实时光谱。实验记录了15次连续往返的光谱,如图6所示。

实验结果表明单次测

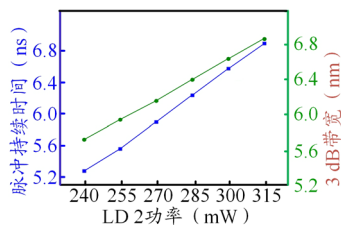


图5 方波脉冲持续时间与光谱3 dB带宽随LD2泵浦功率的变化图

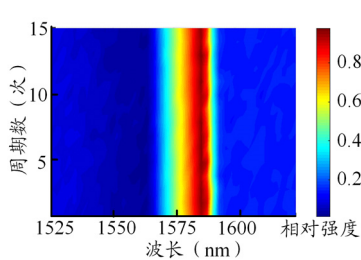


图6 DFT处理后的连续测量光谱强度

量光谱在波长为1586.10 nm处条纹的亮度具有最大值,即可以认为该激光器光谱的中心波长为1586.10 nm。与用OSA测到的中心波长(1586.18 nm)相比较,在误差允许的范围内,可以认为两者是相等的。另外,该激光器谐振腔多次往返时在中心波长处具有几乎相同的强度,也表明该激光器具有良好的稳定性。

3 结论语

本文研究了脉冲持续时间可调谐的方波脉冲掺铒光纤激光器,实验得到了重复频率为1.51 MHz的方波脉冲,通过改变NALM中的泵浦功率,可以连续地调节方波脉冲的宽度。实验发现方波脉冲单次光谱的线宽随NALM泵浦功率的增大而增大。本文利用DFT技术,测得锁模脉冲光谱的实时变化过程,该激光器在多次往返时具有几乎相同的光谱,谐振腔具有良好的稳定性、周期性等特性。这些结果将有助于进一步研究非线性光学系统中的复杂孤子动力学,也将为表征超快光纤激光器的锁模质量提供有效的参考。

参考文献:

- [1] RICHARDSON D J, LAMING R I, PAYNE D N, et al. Selfstarting, passively modelocked erbium fibre ring laser based on the amplifying Sagnac switch[J]. Electronics Letters, 1991, 27(6): 542-543.
- [2] MATSAS V J, NEWSON T P, ZERVAS M N. Self-starting passively mode-locked fibre ring laser exploiting nonlinear polarisation switching[J]. Optics Communications, 1992, 92(1-3): 61-66.
- [3] CHEN G, GU C, XU L, et al. Simulation of nanosecond square pulse fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 17(9):48-50.
- [4] MEI L, CHEN G, XU L, et al. Width and amplitude tunable square-wave pulse in dual-pump passively mode-locked fiber laser [J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3235-3237.
- [5] LIU J, CHEN Y, TANG P, et al. Generation and evolution of mode-locked noise-like square-wave pulses in a large-anomalous-dispersion Er-doped ring fiber laser[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6418-6427.
- [6] MA W, WANG T, SU Q, et al. 19 μ m square-wave passively Q-witched mode-locked fiber laser [J]. Optics Express, 2018, 26(10): 325242-1-325242-4.
- [7] LIU Xueming, YAO Xiankun, CUI Yudong. Real-Time Observation of the Buildup of Soliton Molecules [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(2): 023905-1-023905-5.