

doi: 10. 3788/gzxb20174606. 0614002

基于类噪声方波脉冲的掺铒光纤激光器

张永棠^{1,2}

(1 广东东软学院 计算机科学与技术系, 广东 佛山 528225)

(2 南昌工程学院 江西省协同感知与先进计算技术研究所, 南昌 330003)

摘 要: 搭建了长腔“8”字型掺铒光纤激光器, 并对产生的谐波锁模方波脉冲进行了实验研究. 结果表明, 该脉冲具有光滑的宽带光谱, 示波器上显示为方波脉冲, 但自相关迹证实其为类噪声脉冲, 即为类噪声方波脉冲; 通过调节偏振控制器和泵浦功率等激光器腔内参量, 获得了高达 5 阶的谐波锁模类噪声方波脉冲; 该类噪声方波脉冲并非可以无限增大脉冲能量, 而是在一定条件下产生脉冲分裂, 出现谐波锁模方波脉冲现象.

关键词: 光纤激光器; 类噪声; 方波脉冲; 谐波锁模

中图分类号: TN253; TN914

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0614002-5

Erbium-Doped Fiber Laser Based on the Noise-like Square Wave Pulse

ZHANG Yong-tang^{1,2}

(1 Department of Computer Science and Technology, Guangdong Neusoft Institute, Foshan Guangdong 528225, China)

(2 Institute of Cooperative Sensing and Advanced Computing Technology, Nanchang Technology Institute, Nanchang 330003 China)

Abstract: The long cavity "8" shaped erbium-doped fiber laser to produce a square wave harmonic mode-locked pulses were studied experimentally. This type has a smooth broadband pulse spectrum shown as a square wave pulse on the oscilloscope, but confirmed that the autocorrelation trace of pulse noise categories, namely noise-square wave pulse. Experiment by adjusting the laser cavity parameters, such as polarization controller and pump power, gets up to 5th order harmonic mode-locked noise-square wave pulse. Experimental results show that the noise-square-wave pulses generated in the fiber laser is not infinitely increasing the pulse energy, but under certain conditions will produce a pulse division, square wave pulse harmonic mode locking phenomenon.

Key words: Fiber laser; Noise-like; Square wave pulse; Harmonic mode-locking

OCIS Codes: 140.3510; 140.3500; 140.4050

0 引言

被动锁模超短脉冲光纤激光器由于其体积小、结构简单、成本低等优点, 在光通信、光传感、天文学、生物医学、光学测量等领域具有潜在的应用价值^[1]. 光纤激光器获得被动锁模脉冲输出可以通过在激光腔内引入非线性偏振旋转技术^[2-3]、非线性放大环境技术^[4-5]或者真实可饱和吸收体来实现^[6-7]. 一般来说, 在被动锁模光纤激光器中获得的脉冲具有高斯或双曲正割形状. 文献[8-9]研究了脉冲形成机制, 即耗散孤子共振(Dissipative Soliton Resonance, DSR). DSR 现象是 2008 年 Akhmediev 等在求解 Cubic-quintic Ginsburg-Landau(CGL)方程^[10-11]时发现的. 在耗散孤子形成过程中, 当激光器的腔内参量满足某些特定条件时, 形成

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61363047)、江西省科学技术创新项目(No. GJJ12255)和佛山市科技创新项目(No. 2016AG100382)资助

第一作者: 张永棠(1981-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为光通信及无线传感器网络应用、网络空间安全. Email: 1141760796@qq.com

收稿日期: 2016-12-26; **录用日期:** 2017-02-24

<http://www.photon.ac.cn>

的一种特殊孤子形态,这种孤子随着泵浦功率的不断增大,在示波器上显示为方波脉冲,且其脉宽无限增大,但脉冲峰值功率保持为一常量,该脉冲被定义为 DSR 脉冲^[9,12].工作在 DSR 区域的锁模脉冲被认为是抑制脉冲分裂从而提高光纤激光器中锁模脉冲能量的一种有效途径.随后,DSR 现象在非线性偏振旋转锁模光纤激光器^[13-14]和“8”字型光纤激光器中得到实验证实^[7].由于 DSR 方波脉冲是能够实现抵御波分裂的新型孤子,因此无论对于实际应用还是孤子非线性研究领域都具有重要的意义.

近年来,在被动锁模光纤激光器中,当腔内参量满足某些特定条件时,会观察到方波脉冲^[15-16].当方波脉冲在光纤激光器中出现时,几乎都符合 DSR 现象特性.本文搭建了一种长腔长“8”字型光纤激光器,获得了 135 nJ 的类噪声方波脉冲输出,并研究了该类噪声方波脉冲的输出特性.实验发现,当调节激光腔内偏振控制器状态时,类噪声方波脉冲出现脉冲分裂现象,从而输出谐波锁模方波脉冲.类噪声方波脉冲不像 DSR 脉冲一样无限增大脉冲能量,而是在一定条件下产生脉冲分裂,出现谐波锁模方波脉冲现象.该研究有利于进一步理解类噪声方波脉冲的本质特性.

1 实验装置

实验中使用的“8”字型光纤激光腔如图 1.“8”字型腔的两端分别是非线性放大环形镜(Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM)和单向萨格纳克环(Sagnac Ring, SR),并通过一个 2×2 的 3 dB 耦合器连接.腔内用一段 4 m 的掺铒光纤作为增益介质,色散值为 $15 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,由一台 976 nm 的连续光激光器对其进行泵浦.在腔内加入一段 40 m 的普通单模光纤,它的色散值为 $17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.整个激光器腔长 58.6 m.

腔内脉冲的偏振态通过两个偏振控制器来调整.

偏振无关隔离器用来确保腔内激光的运转方向.腔内激光通过一个 30 : 70 的耦合器输出,利用光谱仪(OSA, Anritsu MS9710C)^[18]和示波器(LeCroy Wave Runner 104MXi, 1GHz)^[19]对其进行测量.实验中采用 30 : 70 的光纤耦合器是为了输出脉冲具有更大的能量,脉冲的内部特性通过自相关仪来测量.

2 实验结果与讨论

实验中,由于 NALM 具有类可饱和吸收效应,因此通过适当调节两个偏振控制器,激光器可以达到自启动基频锁模,其锁模阈值为 1.8 W.为了达到更好的锁模状态,继续增加泵浦功率到 2.4 W 并观察光谱和时域特性,在增加泵浦的过程中光纤激光器始终能够保持锁模状态.图 2 给出了泵浦功率为 2.4 W 时的基频锁模光谱图.

由图 2 可知,锁模方波脉冲的光谱中心波长为 1 609.08 nm,光谱带宽为 10.32 nm,并且具有光滑的光谱形状,在示波器上探测到方波脉冲序列的重复频率为 6.4 kHz,脉宽为 48.137 ns,是激光器的方波脉冲.此时,装置中的两个偏振控制器都处于饱和吸收状态,当等效的饱和吸收满足调 Q 技术条件时,激光器就产生锁模状态.为了验证调节偏振控制器对锁模状态的影响,分别将偏振控制器的泵浦功率调整为 1.9 W 和 2.4 W,在示波器上产生的脉冲波形图如图 3.

由图 3 可知,不同泵浦功率对应的重复频率也发生了变化,分别为 4 kHz 和 6.4 kHz.因为调节偏振控制器会引起激光器腔内损耗的变化,进而改变了重复频率.此外,当泵浦功率升高时,示波器上显示的脉冲宽

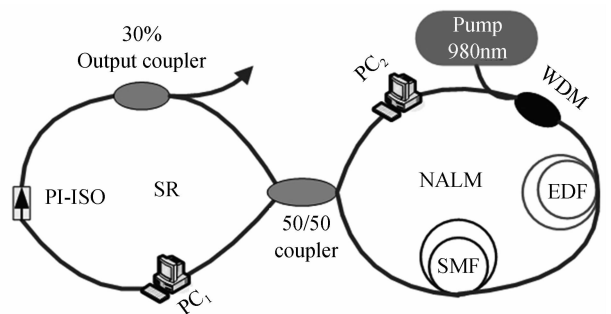


图 1 “8”字型光纤激光器实验装置

Fig. 1 Schematic of the proposed figure-eight fiber laser

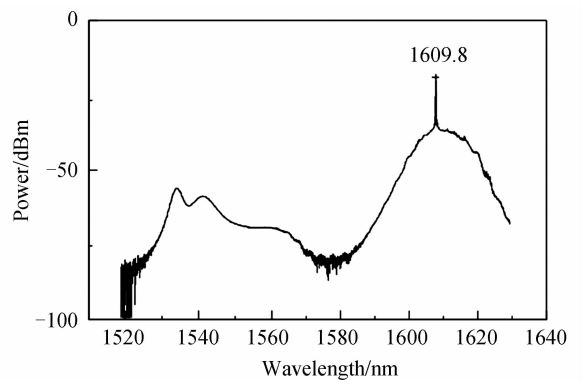


图 2 泵浦功率为 1.9 W 时的基频锁模光谱

Fig. 2 The mode-locked spectrum of pump power 2.4 W

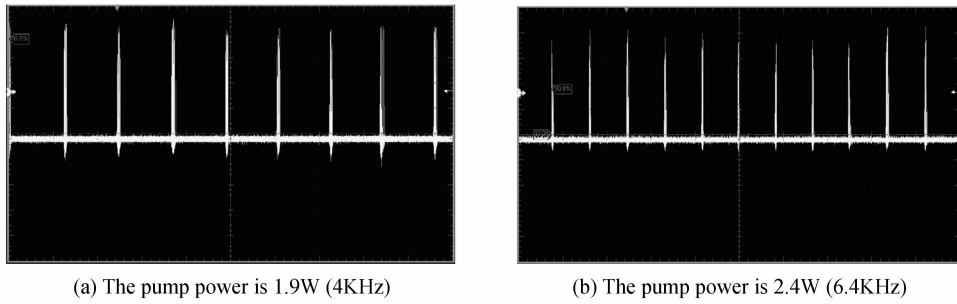


图3 不同泵浦功率下的波形

Fig. 3 Waveforms of different pump power

度也随之增大,但脉冲的幅度基本保持不变.因此,实验获得的方波脉冲与 DSR 方波脉冲具有几乎相同的演化特性.然而,当采用自相关仪测量方波脉冲的精细结构时,发现自相干迹显示为在宽的平台有一个尖峰,这是典型的类噪声脉冲的自相关迹曲线^[7,15],其测量结果如图 4.

由图 4 可知,自相干信号窗口并不平滑,这是由于自相干仪没有调节到最佳状态引起的.因此,实验测量结果可以证明获得的方波脉冲类型是类噪声脉冲而非运转在 DSR 区域的无精细结构的单一相干脉冲.

一般来说,泵浦功率越高,光纤激光器中锁模脉冲就越容易出现脉冲分裂现象.为观察类噪声方波脉冲是否会出现脉冲分裂现象,将泵浦功率提高到 3.5W,然后只调节腔内两个偏振控制器.实验发现,与 DSR 脉冲不同的是,调节偏振控制器,类噪声方波脉冲开始分裂,并且出现了谐波锁模方波脉冲的现象.当出现类噪声方波脉冲谐波锁模时,光谱形状与基频脉冲类似.五个波长谐波连续锁模的光谱图如图 5.

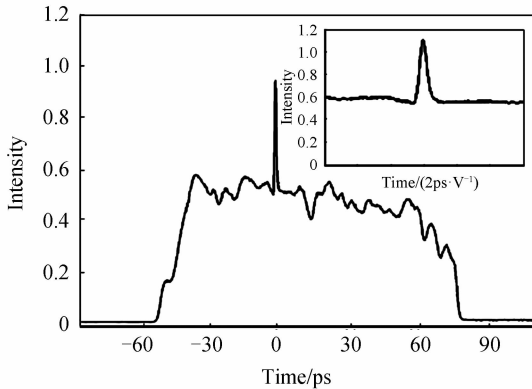


图4 脉冲自相关迹

Fig. 4 Autocorrelation trace of the mode-locked pulse-train

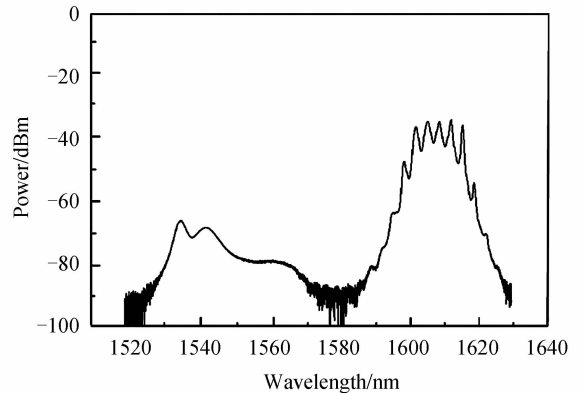


图5 五个波长的连续锁模光谱图

Fig. 5 Spectrum of the harmonic mode locking operation

五个连续锁模的光谱中心波长分别为 1 603.68 nm、1 605.98 nm、1 609.12 nm、1 612.51 nm 和 1 617.82 nm,每个波长光谱带宽分别为 1.01 nm、1.51 nm、2.1 nm、1.9 nm、1.52 nm,并且左右两个边带符合孤子的典型特征.泵浦功率为 3.5 W 时的五个波长连续锁模波形图如图 6,单个波形图如图 7.



图6 泵浦功率为 3.5 W 时,五个波长连续锁模波形图
Fig. 6 Harmonic mode locking waveform with pump power of 3.5 W

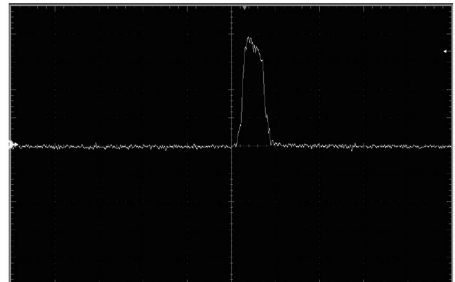


图7 泵浦功率为 3.5 W 时,单个波长连续锁模波形图
Fig. 7 Single waveform of continuous mode locking when the pump power is 3.5 W

对比图 3 和图 5,随着泵浦功率的增大,可以得到连续的锁模.泵浦光进入设备装置以后,3 dB 的光纤耦

合器把泵浦光分成幅值相等、传播方向相反的两路光。其中,一路光进入 NALM,得到放大,而另外一路光在离开 NALM 时被放大,两列光在 NALM 内往返一次后获得了不同的非线性相移,相位差是随脉冲色散形状变化的非常量。通过 NALM 放大后,脉冲中央较强部分相移接近时,由于中央部分的脉冲能量被透射,并且边沿的脉冲由于其功率较低,导致其获得的相移较小,从而被反射。因此,NALM 可以看作是一个快速可饱和吸收体。

实验中,通过进一步调节激光腔内的偏振控制器,可以获得更高次谐波类噪声方波脉冲输出,但在谐波锁模阶数变化过程中,锁模光谱的形状并无明显变化。并且,当谐波类噪声方波脉冲出现时,脉冲与脉冲之间并没有出现相对运动或有明显的相互作用^[20-21]。同时,不同谐波阶数的脉冲序列在示波器上均显示为方波脉冲。此外,通过自相关测量脉冲精细结构并确认不同阶数的谐波方波脉冲仍然为类噪声脉冲。实验中 8 字型光纤激光器是基于 Sagnac 环形镜^[22]进行锁模的,它既是一个可饱和吸收体,又可以看作是梳状滤波器^[23]。因此,通过适当调节环形镜中的光纤双折射,将有望获得多波长类噪声方波脉冲输出。

为了减小光纤激光器腔长对激光输出的影响。将装置中 40 m 普通单模光纤去掉,得到波长分别为 1 608.38 nm、1 611.49 nm 和 1 614.97 nm 可调谐的 3 个峰值的多波长激光输出。激光器输出光谱图如图 8。

从图 8 可以看出,光谱中心频率为 1 612 nm,三个波长间隔频率为 3.3 nm。通过自相关仪测量脉冲结构,发现此时脉冲仍为类噪声脉冲,产生这种激光震荡的原理是掺铒光纤激光器的双折射效应,且,波长间隔频率满足式^[24]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n L} \quad (1)$$

式中, λ 表示光谱的中心频率, Δn 是光纤的双折射率, L 是掺铒光纤的长度。

因此,可以证实连续锁模的重复频率与激光器的腔长有关。

3 结论

构建了一个“8”字型光纤激光器,实验研究了类噪声方波脉冲特性,获得了谐波锁模类噪声方波脉冲。获得的方波脉冲具有平滑的宽带光谱,通过自相关测量证实其为类噪声脉冲。通过调节激光腔参量,观察到了多至 5 阶谐波锁模类噪声方波脉冲的产生。说明类噪声方波脉冲在一定条件下会产生脉冲分裂,证实了类噪声方波脉冲并非可以无限增大脉冲能量。本实验结果不仅为区分 DSR 方波脉冲和类噪声方波脉冲提供了一种判据,而且有利于进一步理解类噪声方波脉冲的机理和特性。

参考文献

- [1] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2013, **42**(4):831-838.
- [2] LIU, Xian. Interaction and motion of solitons in passively-mode-locked fiber lasers[J]. *Physical Review A*, 2011, **8**(4): 53-60.
- [3] SUN Hai-bin, LIU Xun-mei, GONG Yong-kun, *et al.* Broadly tunable dual-wavelength erbium-doped ring fiber laser based on a high-birefringence fiber loop mirror[J]. *Laser Physics*, 2010, **40**(20): 522-527.
- [4] DUAN Ling, LIU Xun-mei, MAO Dong, *et al.* Experimental observation of dissipative solitons resonance in an anomalous-dispersion fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, **32**(20): 265-270.
- [5] WANG Si-ken, NING Qin-yuan, LUO Ai-ping, *et al.* Dissipative solitons resonance in a passively mode-locked figure-eight fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, **33**(21): 2402-2407.
- [6] LEHH H, BRUCKNER S. Toward photonic crystal fiber based distributed chemo sensors[C]. 17th International Conference on Optical Fiber Sensors. SPIE, 2015: 419-422.
- [7] WARKEN F. Ultra-sensitive surface absorption spectroscopy using sub-wavelength diameter optical fibers[J]. *Optics*

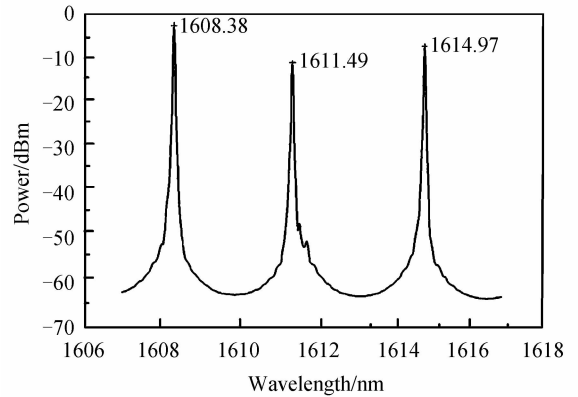


图 8 三波长激光器输出光谱图
Fig. 8 Output spectrum of three wavelength laser

- Letters, 2007, **98**(15): 11952-11958.
- [8] GARCIA R. Ultra-sensitive fluorescence spectroscopy of isolated surface-adsorbed molecules using an optical Nan fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, **100**(17): 21704-21711.
- [9] GARCIA R. Optical Nan fibers and spectroscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **102**(105): 3-15.
- [10] KLIMOV V. Spontaneous emission rate of an excited atom placed near a Nan fiber[J]. *Physical Review A*, 2014, **11**(69): 013812.
- [11] MORINAGA M. Optical nan fiber as an efficient tool for manipulating and probing atomic fluorescence[J]. *Optics Letters*, 2007, **98**(15): 5431-5438.
- [12] SAGUE R. Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent field surrounding an optical Nan fiber[J]. *Physical Review A*, 2010, **7**(10): 203-206.
- [13] KATO S. High-numerical-aperture microlensed tip on an air-clad optical fiber[J]. *Outlets*, 2014, **109**(39): 773-778
- [14] LI Jian-hui, ZHANG Yong-tang, WANG Fan. The design of a high quality and minimum wavelength of ultra-low-loss tapered optical fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(7): 0706005.
李建辉,张永棠,王访. 一种高质量最小波长的超低损耗锥形光纤设计[J]. 光子学报, 2016, **45**(7): 0706005.
- [15] ZHANU Peng, JIA Qing-song, WAND Tian-shu, *et al.* Tunable multi-wavelength brillouin Er-doped fiber laser with 0.173 nm spacing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 57-60.
张鹏,贾青松,王天枢,等. 间隔 0.173nm 的可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 光子学报, 2014, **43**(6): 0614002.
- [16] BANG L. Selective detection of antibodies in microstructure polymer optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2009, **100**(13): 5883-5889.
- [17] SURESH V. A fiber optic evanescent wave sensor used for the detection of trace nitrites in water[J]. *Optics Express*, 2012, **32**(5): 247-250.
- [18] WYATT P. Fluorescent sensing using bucolical tapers sense[J]. *Actuators*, 2013, **50**(6): 315-320.
- [19] CURDIER M. Lateral access to the holes of photonic crystal fibers-selective filling and sensing applications[J]. *Optics Letters*, 2006, **97**(14): 8403-8412.
- [20] GUO Kai-kai, LOU Xiu-tao. Gas-self-filter-based Erbium-doped fiber loop laser for gas detection[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(22): 4811-4816.
- [21] DAE S M, YOUNGJOO C. Switchable dual-wavelength Erbium-doped fiber ring laser assisted with four-wave mixing of dispersion-shifted fiber[J]. *Optics Communications*, 2013, **28**(6): 239-243.
- [22] BRAMBLE G. Optical fiber nanowires and microwares: a review[J]. *Optics Letters*, 2010, **101**(12): 43-50.
- [23] DEASY K, FRAWLEY M. manipulation and trapping of neutral atoms, molecules, and other particles using optical nan fibers; a review[J]. *Sensors*, 2013, **42**(13): 10449-10481.
- [24] LIN Bo, JIANG Meng. Tunable microwave generation using a phase-shifted chirped fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(18): 1292-1294.