

# Harmonic Mode-Locked Noise-Like Rectangle Pulses in an Erbium-Doped Fiber Laser

Zhichao Luo, Xuwu Zheng, Aiping Luo, Wencheng Xu

Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou  
Email: [zcluo@scnu.edu.cn](mailto:zcluo@scnu.edu.cn)

Received: May 10<sup>th</sup>, 2014; revised: Jun. 11<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

We reported on the generation of harmonically mode-locked rectangular pulses in a long cavity figure-eight fiber laser. The mode-locked spectrum was broad and smooth and its pulse profile appeared to be the rectangular shape on the oscilloscope. However, the pulse type was confirmed as noise-like pulse by an autocorrelator, namely noise-like rectangular pulse. By adjusting the laser parameters, such as polarization controllers and pump power, up to 5th harmonic mode-locked noise-like rectangular pulse was achieved. It indicates that the energy of noise-like rectangular pulse in the fiber laser cannot be increased infinitely, but it may split into multiple pulses, leading to the phenomenon of harmonically mode-locked rectangular pulse. The obtained results may be useful for enhancing the understanding of the mechanism and characteristics of noise-like rectangular pulse.

## Keywords

Fiber Laser, Noise-Like, Rectangular Pulse, Harmonic Mode Locking

---

# 谐波锁模类噪声方波脉冲掺铒光纤激光器的研究

罗智超, 郑旭武, 罗爱平, 徐文成

华南师范大学信息光电子科技学院, 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广州  
Email: [zcluo@scnu.edu.cn](mailto:zcluo@scnu.edu.cn)

收稿日期: 2014年5月10日; 修回日期: 2014年6月11日; 录用日期: 2014年6月20日

## 摘要

本文对长腔“8”字型掺铒光纤激光器中产生谐波锁模方波脉冲进行了实验研究。该类型脉冲具有光滑的宽带光谱, 在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, 即类噪声方波脉冲。实验中通过调节激光器腔内参数, 如偏振控制器和泵浦功率等, 获得了高达5阶的谐波锁模类噪声方波脉冲。实验结果表明, 光纤激光器内产生的类噪声方波脉冲并非可以无限增大脉冲能量, 而是在一定条件下会产生脉冲分裂, 出现谐波锁模方波脉冲现象。研究结果有利于进一步理解类噪声方波脉冲的机理和特性。

## 关键词

光纤激光器, 类噪声, 方波脉冲, 谐波锁模

## 1. 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、成本低不仅在光通信领域有重要的应用, 而且在光传感、天文学、生物医学、光学测量等领域也有潜在的应用价值, 因此一直受到广泛的研究[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。但最近, 一种新型的脉冲形成机制 - 耗散孤子共振(dissipative soliton resonance, DSR) 受到了广泛的研究[8]-[12]。DSR 现象首先在 2008 年由 Akhmediev 等人在求解 Cubic-quintic Ginzburg-Landau (CGL)方程时发现在耗散孤子形成过程中, 出现一种新型的孤子非线性现象, 即当激光器的腔内参数满足某些特定值的条件下, 形成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数, 他们将该脉冲定义为 DSR 脉冲[9]。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]-[15]和“8”字型光纤激光器中得到实验证实[16]。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, 只要腔内参数满足某些条件的话, 经常会观察到方波脉冲[8]-[18]。当方波脉冲在光纤激光器中出现的时候, 几乎都符合 DSR 现象的特性。然而, 当在光纤激光器中获得方波脉冲的时候, 大家都关注所获得的方波脉冲是否无精细结构的单一相干脉冲。因此, 自然而然会引出一个问题, 在光纤激光器中是否还有其它类型的方波脉冲具备类似 DSR 现象这种随泵浦功率升高脉冲不断展宽的特征呢? 就在最近, 我们观察到了一种新型的方波脉冲, 它具有与 DSR 脉冲几乎相同的特性[19]。然而, 通过自相关仪的验证, 此方波脉冲本质为类噪声[20]-[22]。实验中我们获得高达 135 nJ 的类噪声方波脉冲输出, 因此类噪声方波脉冲也可以认为是一种获得高能量脉冲的途径。但是, 这种类噪声方波脉冲的能量是否跟 DSR 脉冲一样能够无限增大? 在一定条件下是否会发生脉冲分裂? 为此, 本文构建了一种长腔“8”字型光纤激光器来进一步研究类噪声方波脉冲的输出特性。实验中当仔细调节激光腔内偏振控制器状态的时候, 发现类噪声方波脉冲会出现脉冲分裂的现象, 从而输出谐波锁模方波脉冲。实

验结果表明,类噪声方波脉冲并非可以像 DSR 脉冲一样无限增大脉冲能量,而是在一定条件下会产生脉冲分裂,出现谐波锁模方波脉冲现象。研究结果有利于进一步理解类噪声方波脉冲的本质特性。

## 2. 实验装置

实验中使用的“8”字型光纤激光腔如图 1 所示。“8”字型腔的两端分别是非线性放大环形镜和单向的萨格纳克环,它们通过一个  $2 \times 2$  的 3 dB 耦合器连接起来。腔内用一段 4 m 的铒纤作为增益介质,色散值为  $-15$  ps/nm/km,并且由一台 976 nm 的连续光激光器对其进行泵浦。我们在腔内加入了一段 750 m 的单模光纤,它的色散值是 17 ps/nm/km。腔内脉冲的偏振态通过两个偏振控制器来调整。另外,偏振无关隔离器用来确保腔内激光的运转方向。腔内的激光通过一个 30:70 的耦合器输出,然后我们利用光谱仪(OSA, Anritsu MS9710C)和示波器(LeCroy Wave Runner 104MXi, 1 GHz)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。脉冲的内部特性将通过自相关仪来测量。

## 3. 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 68 mW。为了达到更好的锁模状态,我们继续增加泵浦功率到 125 mW 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 125 mW 时的基频锁模光谱和脉冲图。可以看到,锁模方波脉冲的光谱中心波长为 1566.14 nm, 3 dB 带宽为 8.32 nm,并且具有光滑的光谱形状,如图 2(a)所示。图 2(b)为示波器探测的方波脉冲序列,此时脉冲重复频率为 264.1 kHz,是激光器的基频脉冲。图 2(b)的插图为单个方波脉冲,可以看到示波器上显示的脉冲为方波脉冲,脉宽为 48.137 ns。此外,值得注意的是当泵浦功率升高时,示波器上显示的脉冲宽度也随之增大,而脉冲的幅度基本保持不变。因此,本实验获得的方波脉冲与 DSR 方波脉冲具有几乎相

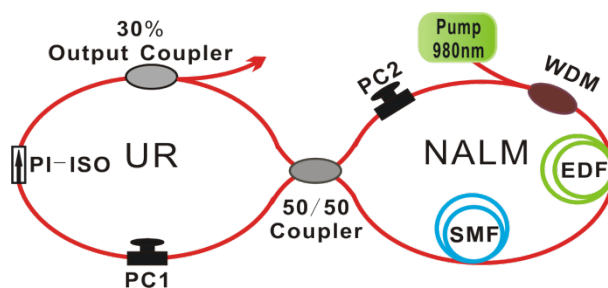


Figure 1. Schematic of the proposed figure-eight fiber laser  
图 1. “8”字型光纤激光器实验装置图

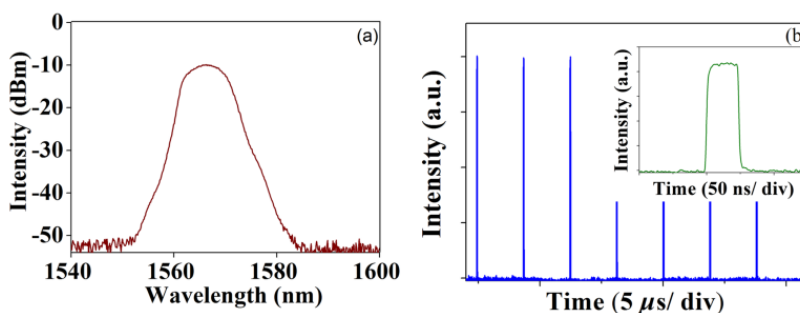


Figure 2. Mode-locked operation at the fundamental repetition rate (a) Mode-locked spectrum; (b) Mode-locked pulse-train  
图 2. 基频锁模的光谱(a)和脉冲序列图(b)

同的演化特性。然而，当我们采用自相关仪测量方波脉冲的精细结构时，发现自相关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[20]-[22]，其测量结果如图3所示。可以看到，这里自相关信号窗口并不平滑，这是由于自相关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我们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。值得注意的是，我们对比了短腔长(如十米左右)和长腔长(如几百米)8 字型光纤激光器的脉冲输出特性，类噪声方波脉冲只有在长腔光纤激光器条件下才能出现。

一般来说，泵浦功率的越高，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，我们将泵浦功率提高到 350 mW，然后只调节腔内两个偏振控制器。实验中发现，与 DSR 脉冲不同的是，通过仔细调节偏振控制器，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的时候，光谱形状与基频脉冲的类似，如图4所示。图5(a)给出了2次谐波类噪声脉冲序列图，可以看到，此时脉冲仍然保持方波形状。通过自相关仪测量脉冲的结构，发现此时方波脉冲仍为类噪声脉冲，如图5(b)所示。

实验中，通过进一步调节激光腔内的偏振控制器，我们可以获得更高次谐波的类噪声方波脉冲输出。图6给出了光纤激光器输出的3次、4次和5次谐波锁模脉冲序列。值得注意的是，在谐波锁模阶数变化的过程中，锁模光谱的形状并无明显的变化。并且，当谐波类噪声方波脉冲出现的时候，脉冲与脉冲

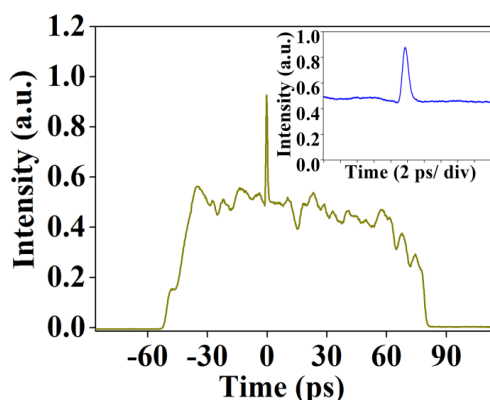


Figure 3. Autocorrelation trace of the mode-locked pulse-train  
图3. 脉冲自相关迹

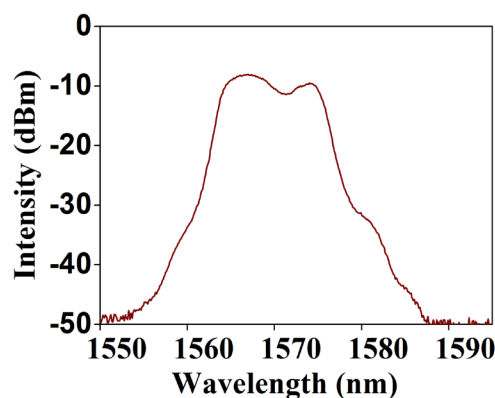
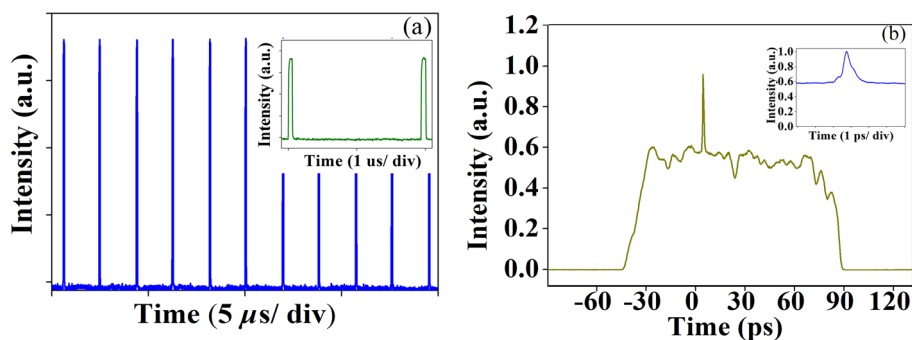
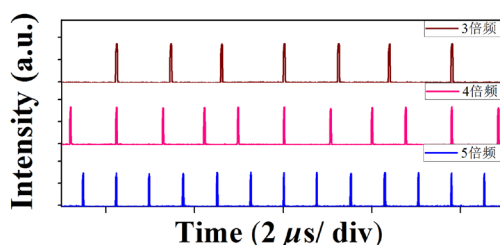


Figure 4. Spectrum of the harmonic mode locking operation  
图4. 谐波锁模的光谱



**Figure 5.** Harmonic mode locking operation (a) Recorded pulse-train; (b) Corresponding autocorrelation trace

**图 5.** 脉冲序列图(a)和脉冲自相关迹(b)



**Figure 6.** 3th, 4th and 5th harmonic mode-locked pulse-trains at the pump power of 350 mW

**图 6.** 在泵浦功率为 350 mW 时获得的 3、4、5 次谐波锁模脉冲序列图

之间并没有出现相对运动或有明显的相互作用[23]。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，我们还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。注意到实验中 8 字型光纤激光器是基于 Sagnac 环形镜进行锁模的，它既是一个可饱和吸收体，又可以看作是梳状滤波器[24] [25]。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。

#### 4. 结论

本文构建了一个“8”字型光纤激光器，实验研究了类噪声方波脉冲的特性，获得了谐波锁模类噪声方波脉冲的产生。获得的方波脉冲具有平滑的宽带光谱，在示波器上脉冲显示为方波脉冲，但通过自相关测量证实其为类噪声脉冲。通过调节激光腔的参数，我们观察到了多至 5 阶谐波锁模类噪声方波脉冲的产生。这就说明了类噪声方波脉冲在一定条件下会产生脉冲分裂的现象，也从另一个方面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。

#### 项目基金

本论文感谢国家自然科学基金项目(11074078, 61378036, 61307058, 11304101)，广东省自然科学基金(S2013040016320)，广州市珠江科技新星专项(2014J2200008)的支持。。

#### 参考文献 (References)

- [1] Keller, U. (2003) Recent developments in compact ultrafast lasers. *Nature*, **424**, 831-838.



- [2] Nelson, L.E., Jones, D.J., Tamura, K., Haus, H.A. and Ippen, E.P. (1997) Ultrashort-pulse fiber ring lasers. *Applied Physics B*, **65**, 277-294.
- [3] Oktem, B., Ülgüdür, C. and Ilday, F.Ö. (2010) Soliton-similariton fiber laser. *Nature Photonics*, **4**, 307-311.
- [4] Richardson, D.J., Laming, R.I., Payne, D.N., Matsas, V. and Phillips, M.W. (1991) Selfstarting, passively modelocked erbium fibre ring laser based on the amplifying Sagnac switch. *Electronics Letters*, **27**, 542-544.
- [5] Luo, Z.C., Ning, Q.Y., Mo, H.L., Cui, H., Liu, J., Wu, L.J., Luo, A.P. and Xu, W.C. (2013) Vector dissipative soliton resonance in a fiber laser. *Optics Express*, **21**, 10199-10204.
- [6] Okhotnikov, O., Grudinin, A. and Pessa, M. (2004) Ultra-fast fibre laser systems based on SESAM technology: new horizons and applications. *New Journal of Physics*, **6**, 177.
- [7] Zhang, H., Tang, D.Y., Knize, R.J., Zhao, L., Bao, Q. and Loh, K.P. (2010) Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser. *Applied Physics Letters*, **96**, 111112.
- [8] Akhmediev, N., Soto-Crespo, J.M. and Grelu, Ph. (2008) Roadmap to ultra-short record high-energy pulses out of laser oscillators. *Physics Letters A*, **372**, 3124-3128.
- [9] Chang, W., Ankiewicz, A., Soto-Crespo, J.M. and Akhmediev, N. (2008) Dissipative soliton resonances. *Physical Review A*, **78**, Article ID: 023830.
- [10] Grelu, Ph., Chang, W., Ankiewicz, A., Soto-Crespo, J.M. and Akhmediev, N. (2010) Dissipative soliton resonance as a guideline for high-energy pulse laser oscillators. *Journal of the Optical Society of America B*, **27**, 2336-2341.
- [11] Ding, E., Grelu, Ph. and Kutz, J.N. (2011) Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked fiber laser. *Optics Letters*, **36**, 1146-1148.
- [12] Grelu, Ph. and Akhmediev, N. (2012) Dissipative solitons for mode-locked lasers. *Nature Photonics*, **6**, 84-92.
- [13] Wu, X., Tang, D.Y., Zhang, H. and Zhao, L.M. (2009) Dissipative soliton resonance in an all-normal-dispersion erbium-doped fiber laser. *Optics Express*, **17**, 5580-5584.
- [14] Luo, Z.C., Cao, W.J., Lin, Z.B., Cai, Z.R., Luo, A.P. and Xu, W.C. (2012) Pulse dynamics of dissipative soliton resonance with large duration-tuning range in a fiber ring laser. *Optics Letters*, **37**, 4777-4779.
- [15] Duan, L., Liu, X.M., Mao, D., Wang, L. and Wang, G. (2012) Experimental observation of dissipative soliton resonance in an anomalous-dispersion fiber laser. *Optics Express*, **20**, 265-270.
- [16] Wang, S.K., Ning, Q.Y., Luo, A.P., Lin, Z.B., Luo, Z.C. and Xu, W.C. (2013) Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked figure-eight fiber laser. *Optics Express*, **21**, 2402-2407.
- [17] Zhang, X.M., Gu, C., Chen, G.L., Sun, B., Xu, L.X., Wang, A.T. and Ming, H. (2012) Square-wave pulse with ultra-wide tuning range in a passively mode-locked fiber laser. *Optics Letters*, **37**, 1334-1336.
- [18] Li, X., Liu, X., Hu, X., Wang, L., Lu, H., Wang, Y. and Zhao, W. (2010) Long-cavity passively mode-locked fiber ring laser with high-energy rectangular-shape pulses in anomalous dispersion regime. *Optics Letters*, **35**, 3249-3251.
- [19] Zheng, X.W., Luo, Z.C., Liu, H., Zhao, N., Ning, Q.Y., Liu, M., Feng, X.H., Xing, X.B., Luo, A.P. and Xu, W.C. (2014) High-energy noise-like rectangular pulse in a passively mode-locked figure-eight fiber laser. *Applied Physics Express*, **7**, Article ID: 042701.
- [20] Horowitz, M., Barad, Y. and Silberberg, Y. (1997) Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser. *Optics Letters*, **22**, 799-801.
- [21] Tang, D.Y., Zhao, L.M. and Zhao, B. (2005) Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser. *Optics Express*, **13**, 2289-2294.
- [22] Zhao, L.M. and Tang, D.Y. (2006) Generation of 15-nJ bunched noise-like pulses with 93-nm bandwidth in an erbium-doped fiber ring laser. *Applied Physics B*, **83**, 553-557.
- [23] Liu, X. (2011) Interaction and motion of solitons in passively-mode-locked fiber lasers. *Physical Review A*, **84**, Article ID: 053828.
- [24] Sun, H.B., Liu, X.M., Gong, Y.K., Li, X.H. and Wang, L.R. (2010) Broadly tunable dual-wavelength erbium-doped ring fiber laser based on a high-birefringence fiber loop mirror. *Laser Physics*, **20**, 522-527.
- [25] Ning, Q.Y., Wang, S.K., Luo, A.P., Lin, Z.B., Luo, Z.C. and Xu, W.C. (2012) Bright-dark pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively mode-locked fiber laser. *IEEE Photonics Journal*, **4**, 1647-1652.