

调 Q 锁模类噪声方波脉冲掺铒光纤激光器

梁佩茹, 宁秋奕, 陈伟成

(佛山科学技术学院 物理与光电工程学院, 广东 佛山 528000)

摘要: 对基于非线性偏振旋转技术的 L 波段掺铒被动锁模光纤激光器中产生调 Q 锁模类噪声方波脉冲进行了实验研究。该类型脉冲中调 Q 包络内部包含的脉冲是基频方波, 通过自相关迹证实该方波为类噪声脉冲。为了容易实现类噪声方波脉冲输出, 将一段 250 m 普通单模光纤引进激光腔内。适当调节腔内的偏振控制器和泵浦功率, 获得了基频为 778.21 kHz 的连续波锁模类噪声方波脉冲和由 3.81 kHz 可调谐到 9.01 kHz 的重复频率, 单个调 Q 包络最高能量为 1.06 μJ 的调 Q 锁模类噪声方波脉冲。研究结果有利于进一步理解被动锁模光纤激光器中类噪声脉冲和调 Q 锁模的机理和特性。

关键词: 类噪声方波脉冲; 调 Q 锁模; 光纤激光器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0803009

Q-switched mode-locking noise-like rectangular pulses erbium-doped fiber laser

Liang Peiru, Ning Qiuyi, Chen Weicheng

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: The Q-switched mode-locking (QML) rectangular pulses in the L-band erbium-doped passively mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation technique was researched experimentally. The Q-switched envelope of this type of pulses contained the rectangular pulse with fundamental repetition rate, which was confirmed as noise-like pulse by an autocorrelator. A 250 m long section of single mode fiber was inserted into the cavity to ensure the noise-like rectangular pulses easy to be obtained. By carefully adjusting polarization controllers and pump power in the cavity, both the continuous-wave mode-locking noise-like rectangular pulses with fundamental repetition rate of 778.21 kHz and the QML noise-like rectangular pulses with tunable repetition rate from 3.81 kHz to 9.01 kHz and the highest energy of Q-switched pulse envelop 1.06 μJ were achieved. The research results further reveal the fundamental physics of noise-like pulses and QML operation in the passively mode-locked fiber lasers.

Key words: noise-like rectangle pulses; Q-switched mode-locking; fiber laser

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(11604049); 广东省特种光纤材料与器件工程技术研究开发中心(华南理工大学)开放课题;
广东省大学生创新创业训练计划(201611847093)

作者简介: 梁佩茹(1997-), 女, 本科生, 主要从事超快光纤激光器及应用方面的研究。Email: 418380663@qq.com

导师简介: 宁秋奕(1986-), 女, 讲师, 博士, 主要从事超快光纤激光器及应用方面的研究。Email: ningtianweng@163.com

0 引言

被动锁模光纤激光器由于其光束质量好、体积小、结构简单、成本低等优点,在光通信、光纤传感、材料加工和生物医疗等领域有着重要的潜在应用价值^[1-4]。一般而言,在被动锁模光纤激光器中能获得具有高斯或双曲正割形状的传统锁模超短脉冲,但通过合理调节腔内参数,还能获得类噪声脉冲^[5]。与传统的锁模脉冲相比,类噪声脉冲的典型特征主要表现为:(1)在时域上是一个宽的波包,波包内部是由许多强度和宽度随机演化的皮秒、飞秒脉冲构成的精细结构,因此在用自相关对类噪声脉冲宽测量的时候,会看到一个很宽的底座,中间有一个相干的尖峰;(2)光谱较光滑,没有 Kelly 边带和陡峭的边沿,其宽度较宽,甚至超过增益光纤的增益带宽;(3)具有低时域相干性。基于以上特点,类噪声脉冲在超连续谱产生、低光学相干断层扫描和低相干光谱干涉仪等领域潜在重要应用^[6-8]。

类噪声脉冲因具有上述特殊的物理特性和广泛的应用前景而备受研究人员关注。1997年, M. Horowitz 等在线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)腔内首次获得类噪声脉冲,并认为类噪声脉冲是由腔内双折射、增益和非线性透过率元件的共同作用产生^[5]。随后的研究发现,类噪声脉冲可以在不同的净色散腔、不同的锁模方法和不同的激光波段内获得,并且激光器在不同工作区域内产生类噪声脉冲的机制和特性也有所差异。2005年, D. Y. Tang 等在低双折射负色散腔中获得类噪声脉冲,并通过理论模拟发现,类噪声脉冲的产生是由孤子的坍塌效应和腔内正反馈共同引起的^[9]。2007年, L. M. Zhao 等在增益引导孤子激光器中获得类噪声脉冲,并认为是由光纤正色散与使用 NPR、半导体可饱和吸收镜等被动锁模技术引起的峰值功率钳制效应共同作用形成类噪声脉冲^[10]。值得指出的是,上述报道展示类噪声脉冲包络的整体轮廓形均似噪声,然而实验中由于示波器带宽限制,类噪声脉冲包络还可以表现为方波或者其他形状。2014年, X. W. Zheng 等在掺铒“8”字形光纤激光器中得到了 135 nJ 高能量的矩形类噪声脉冲,实验发现类噪声脉冲演化与耗散孤子共振(Dissipative Soliton

Resonance, DSR)的脉冲演化非常相似^[11]。2017年, Z. S. Deng 等在基于 NPR 技术和碳纳米管可饱和吸收体的复合锁模光纤激光器中可切换产生类噪声方波和 DSR,其中类噪声方波会随着泵浦功率升高从矩形演化成类高斯形^[12]。

另一方面,脉冲激光器按照时间特性可以分为调 Q、连续波锁模(Continuous-wave Mode-Locking, CML)和调 Q 锁模(Q-switched Mode-Locking, QML)三种运转态。其中, QML 同时具有调 Q 和锁模两种运转态的特性,因而在对光纤激光器的机理研究方面具有其独特的价值^[13-15]。然而,目前对于 QML 的研究主要集中在传统锁模脉冲。综上所述,将 QML 研究拓展至类噪声脉冲,不但能加深人们对光纤激光器运转机理的理解,而且有利于对其潜在应用进一步挖掘。

文中构建了一种基于 NPR 的 L 波段掺铒被动锁模光纤激光器来进一步研究类噪声方波脉冲的输出特性。在腔内,引进了一段长度为 250 m 的单模光纤,有利于实现类噪声方波脉冲输出。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能在 CML 和 QML 两种模式下运转。固定好偏振控制器,逐渐增加泵浦功率,研究了 QML 类噪声方波脉冲在腔内的演化特性。研究结果有利于进一步理解类噪声方波脉冲和调 Q 锁模的本质特性。

1 实验装置

图 1 是实验中搭建的掺铒光纤激光器,它是利用 NPR 效应实现锁模的。一段 4 m 的掺铒光纤(YOFC EDF1036)作为激光腔的增益介质,群速度色散值 $-15 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,用来实现 L 波段激光输出。为了增加激光腔的长度,在激光腔中加进了一段 250 m 的单模光纤,群速度色散值 $17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。整个激光腔的长度大约为 264.04 m,对应的锁模基频为 778.21 kHz。泵浦光源采用一台最大功率为 460 mW、中心波长 980 nm 的半导体激光器,输出光通过波分复用器耦合器入激光谐振腔内。一个偏振相关隔离器保证激光在腔内的单向运转并对激光起到偏振选择的作用。两个偏振控制器用于调节光的偏振状态。一个 10/90 的光纤耦合器用于激光输出,输出端口为 10%。在耦合输出后,一台光学光谱分析仪(Anritsu MS9710C)和一个高速示波器(Agilent

technologies DSO-X 3102A, 1 GHz) 分别用来测量输出光谱和脉冲。

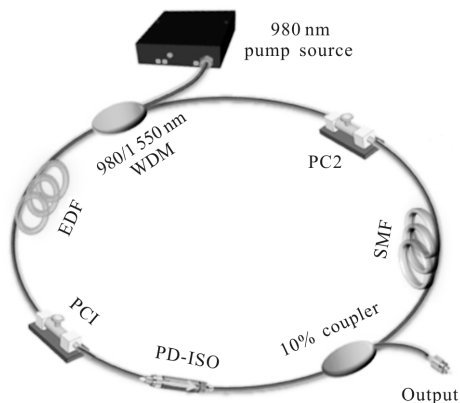


图 1 实验原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment setup

2 实验结果与分析

实验中,利用 NPR 的类可饱和吸收特性在激光器中实现锁模。适当调节腔内的偏振控制器和泵浦功率,比较容易获得 CML 锁模类噪声方波脉冲,自启动功率为 130 mW。图 2 展示了泵浦功率为 140 mW 时 CML 类噪声方波脉冲的光谱图、脉冲图以及自相关图。如图 2(a)所示,方波脉冲工作在 L 波段,光谱中心波长为 1607.87 nm,3 dB 带宽为 16.74 nm,并且具有光滑的光谱形状。在图 2(b)中,方波脉冲的宽度为 6.35 ns,脉冲重复率为基频 778.21 kHz。此外,从图 2(c)中很容易看出在自相关迹上,有一个相干峰坐落在一个很宽的基座上,这是典型的类噪声脉冲自相关迹。由自相关轨迹可知,类噪声方波脉冲包含大量小脉冲,并且这些脉冲簇的幅度和相位都是随机的,然而实验中示波器受带宽限制无法观察它的内部精细结构,因此所获的方波脉冲在示波器上显示为单个脉冲,而且没有多脉冲的振荡^[11]。值得注意

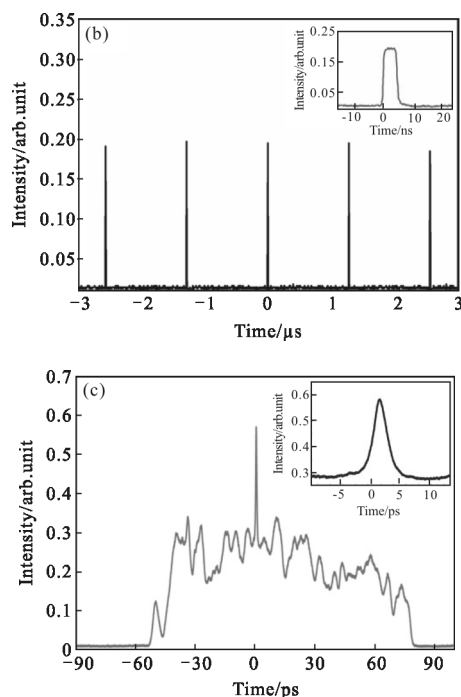
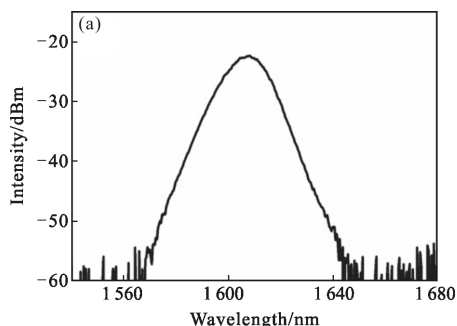


图 2 CML 类噪声方波脉冲的状态:(a) 光谱图,(b) 脉冲序列,(c) 自相关轨迹

Fig.2 State of CML noise-like rectangular pulses operation:

(a) spectrum, (b) pulse train, (c) autocorrelation trace

的是,在该激光器中,没有观察到常规的孤子脉冲锁模。这是由于腔内单模光纤长度比较长,使得腔内非线性累积比较大,容易导致杂乱无章的多脉冲状态的形成,从而很难获得常规的孤子脉冲锁模。

虽然 CML 类噪声方波脉冲的自启动阈值是 130mW,但是由于泵浦的迟滞效应,输入功率降到 100 mW 时方波脉冲仍能稳定输出^[16]。在这种情况下,固定偏振控制器的位置,测量了 CML 类噪声方波脉冲宽度与输出功率随泵浦功率变化的规律,如图 3 所示。从图中可以看出,随着泵浦功率升高,脉冲宽度

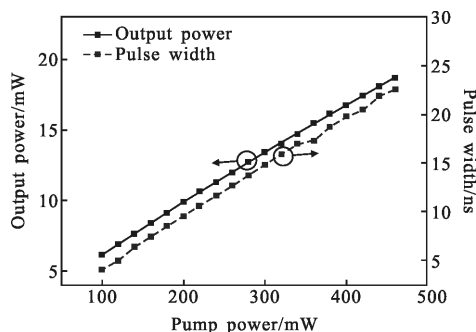


图 3 CML 类噪声方波脉冲的输出功率和脉宽随泵浦功率的变化

Fig.3 Output power and pulse width of CML noise-like rectangular pulses evolution with pump power

与输出功率单调增大。当泵浦功率为最大值 460 mW 时, 脉冲宽度为 22.61 ns, 输出脉冲的平均功率是 18.71 mW, 由于腔的重复频率是 778.21 kHz, 所以单脉冲最大能量是 24.04 nJ。值得注意的是, 当脉冲宽度随着泵浦功率升高而增大时, 脉冲的幅度和中心波长保持不变。

实验中, 进一步仔细调节偏振控制器和输入功率, 在这个过程中, 脉冲光谱出现调制。将功率固定在 70 mW, 精细地调节偏振控制器, 示波器上强度一致的方波脉冲序列开始出现强度调制, 直至到达稳定的调 Q 锁模脉冲运转态, 如图 4 所示。由图 4(a) 可知, QML 也是工作在 L 波段, 光谱中心波长为 1 601.37 nm, 3 dB 带宽为 5.43 nm。当 QML 运转态开始出现时, 频谱由光滑变得无序, 这种现象应该是由腔内的多模振荡和腔内微扰造成的^[15]。图 4(b) 为 QML 脉冲序列, 重复频率为 3.81 kHz。图 4(c) 是典型的单个调 Q 锁模脉冲, 图中插图还展示了调 Q 包络内部每个脉冲的形状是方波脉冲, 其脉冲宽度为 22.1 ns。由于在实验中观察到了 CML 类噪声方波脉冲, 因此推断调 Q 包络内部的方波脉冲也是类噪声脉冲, 并通过测量脉冲的自相关迹来证明这个结论。如图 4(c) 所示, 自相关迹上有一个相干峰落在一个很宽的基座上, 与图 2(c) 一样, 这是典型的类噪声脉冲自相关迹。换言之, 在实验中观察到了 QML 类噪声方波脉冲。

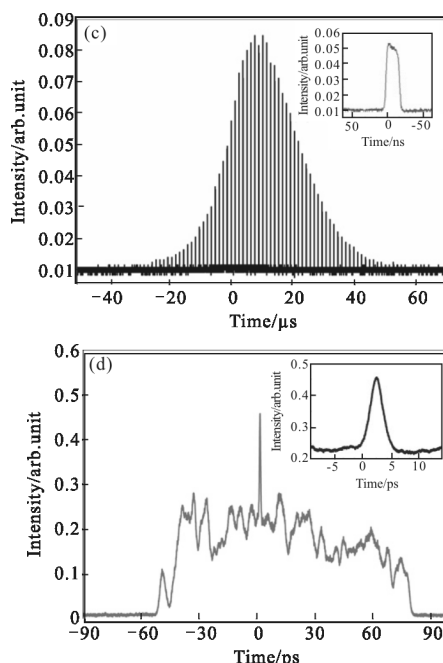
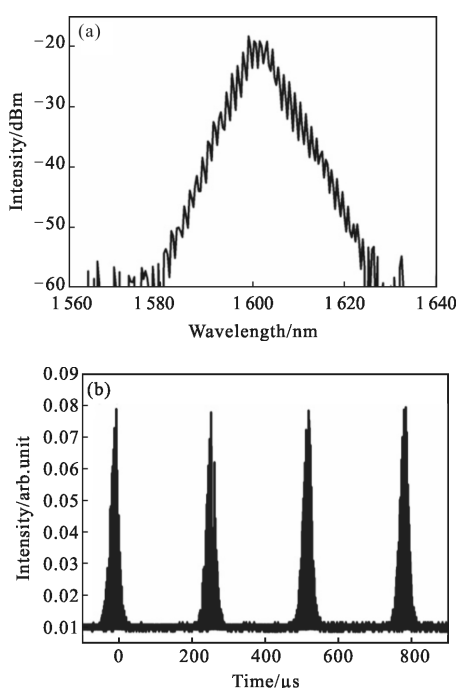
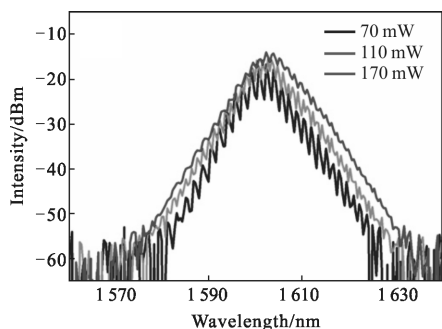


图 4 QML 类噪声方波脉冲的状态: (a) 光谱图, (b) 脉冲序列, (c) 单个调 Q 包络脉冲序列, (d) 自相关轨迹
Fig.4 State of QML Noise-like rectangular pulses: (a) spectrum, (b) pulse train, (c) pulse in Q-switched envelope, (d) autocorrelation trace

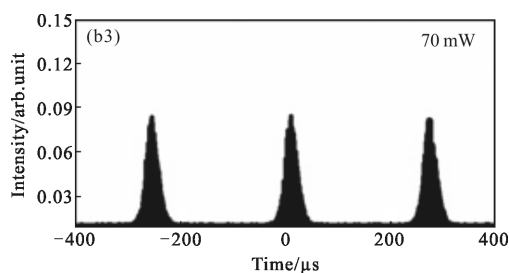
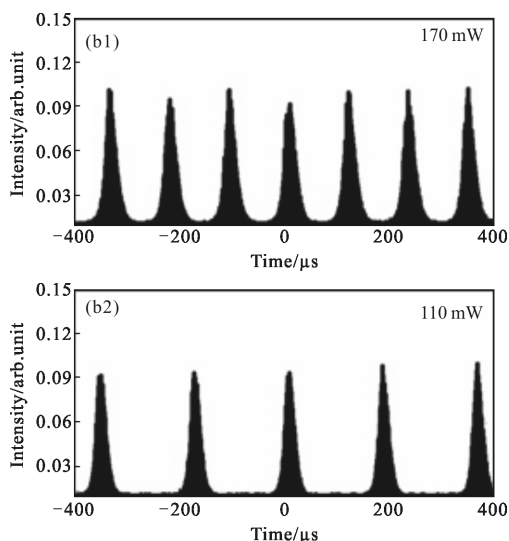
在实验中, 当腔参数保持不变, 以及没有外界环境干扰下, 输出的 QML 类噪声方波脉冲序列能一直保持稳定。但是, 当泵浦功率超过 170 mW 后, 类噪声调 Q 锁模脉冲开始变得不稳定, 此时适当调节腔内偏振控制器, 类噪声调 Q 锁模脉冲可以切换至如图 2 的连续波锁模类噪声方波脉冲。和传统调 Q 锁模脉冲一样, 类噪声方波脉冲在调 Q 锁模状态下运转主要是由于脉冲的偏振态和腔内偏振旋转技术的类可饱和和吸收体特性的相互作用引起^[13]。

为了进一步研究 QML 类噪声方波脉冲与泵浦功率之间的关系, 固定好偏振控制器的方向, 将泵浦功率从 70 mW 缓慢升至 170 mW, 测量脉冲随功率增大的演化特性, 如图 5 所示。图 5(a) 和 (b) 展示了在泵浦功率为 70、110、170 mW 对应的 QML 类噪声方波脉冲的光谱图和脉冲图。由图 5(a) 可知, 随着泵浦功率升高, 光谱的调制变小, 中心波长由 1 601.36 nm 漂移到 1 603.49 nm, 3 dB 带宽由 5.43 nm 增加到 6.09 nm。图 5(c) 给出了调 Q 包络的重复率、输出功率与泵浦功率的变化关系。从图中可以看到, 调 Q 包络的重复率和输出功率随着泵浦功率的增加几乎

呈线性增加的趋势。当泵浦功率由 70 mW 逐渐升高至 170 mW, 输出功率由 3.023 mW 逐渐增大至 9.56 mW, 重复率由 3.81 kHz 可调谐至 9.01 kHz。在图 5(c)的测量基础上, 计算出单个调 Q 包络的能量与泵浦功率的关系, 如图 5(d)所示。当泵浦功率为 170 mW 时, 单个调 Q 包络能量最大, 为 1.06 μ J。此外, 随着泵浦功率的逐渐升高, 调 Q 包络内部的类噪声方波脉冲并没有分裂, 但是脉冲宽度随着泵浦功率改变会发生变化。因此, 调 Q 包络内部的类噪声方波脉冲的脉宽和调 Q 包络的 3 dB 宽度随泵浦功率的变化关系也被测量了, 如图 5(e)所示。由图 5(e)可知, 当泵浦功率由 70 mW 升高至 120 mW 时, 方波脉冲宽度由 22.61 ns 增大至 56.21 ns; 当泵浦功率由 120 mW 升高至 140 mW, 方波脉冲宽度保持在最大值 56.21 ns 不变; 当泵浦功率有 140 mW 升至 170 mW 时, 方波脉冲宽度由 56.21 ns 减小至 47.01 ns; 而调 Q 包络的 3 dB 宽度则随着泵浦功率的升高变化不大, 在 21.84 ~ 23.47 μ s 来回波动。

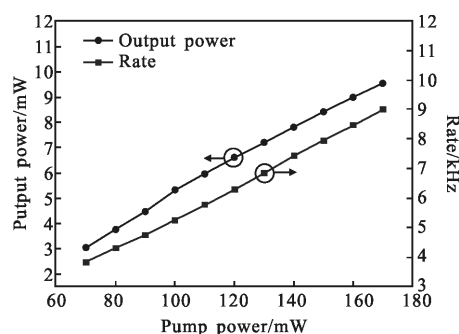


(a) 不同泵浦功率对应的光谱图
(a) Spectrum under different pump power



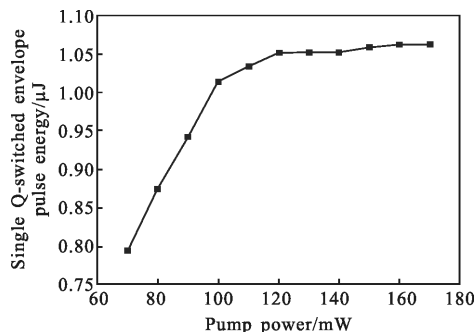
(b) 不同泵浦功率对应的脉冲序列图

(b) Pulse trains under different pump power



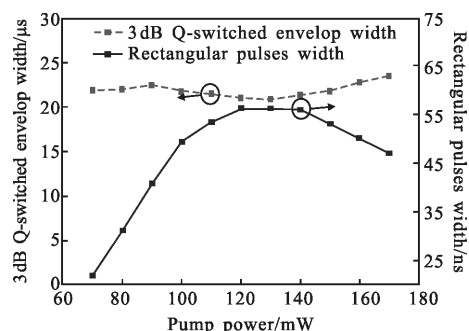
(c) 输出功率和重复率随泵浦功率的变化图

(c) Output power and repetitive rate evolution with pump power



(d) 单个调 Q 包络能量随泵浦功率的变化图

(d) Energy of single Q-switched envelope evolution with pump power



(e) 调 Q 包络 3 dB 脉宽与方波脉宽随泵浦功率的变化图

(e) 3 dB Q-switched envelope width and rectangular pulses width evolution with pump power

图 5 QML 类噪声方波脉冲随功率增大的演化特性

Fig.5 Evolution characteristics of QML noise-like rectangular pulses with increasing power

3 结 论

文中构建了一个基于 NPR 技术的 L 波段被动锁模光纤激光器, 实验观察到类噪声方波脉冲可以在 CML 和 QML 两种模式下运转。当泵浦功率为 170 mW, QML 类噪声方波脉冲输出功率为 9.56 mW, 重复频率为 9.01 kHz, 单个调 Q 包络能量为 1.06 μ J。实验中, 固定偏振控制器, 调节泵浦功率, 研究了调 Q 锁模类噪声方波脉冲的光谱、脉冲序列、重复频率、输出功率、单个调 Q 包络能量、调 Q 包络内部方波脉冲的脉宽和调 Q 包络的 3 dB 宽度随泵浦功率变化的特性。研究结果不仅丰富了类噪声方波脉冲和调 Q 锁模的机理和特性, 还有利于光纤激光器应用的拓展。

参考文献:

- [1] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 142–150. (in Chinese)
- [2] Shenoy Manjunatha, Huang Haiying. An optical fiber-based corrosion sensor based on laser light reflection [C]//SPIE, 2010, 7647: 76473O.
- [3] Vid Agrež, Rok Petkovšek. Gain-switched Yb-doped fiber laser for microprocessing [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(13): 3066–3072.
- [4] Barton S N, Janoff K A, Bakos G J. Medical laser fiber optic cable having improved treatment indicators for BPH surgery: EP1395192 A1 [P]. 2004–03–10.
- [5] Horowitz M, Barad Y, Silberberg Y. Noise-like pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11): 799–801.
- [6] Hu Jian, Zhang Xian Ming. Super-broad spectrum noise-like pulse fiber laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2016, 33(3): 292–295. (in Chinese)
- [7] You Y, Wang C, Lin Y, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography 1.3 μ m central wavelength by using a supercontinuum source pumped by noise-like pulses [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(2): 25101.
- [8] Keren S, Horowitz M. Interrogation of fiber gratings by use of low-coherence spectral interferometry of noise-like pulses [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(6): 328–330.
- [9] Tang D Y, Zhao L M, Zhao B. Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2289–2294.
- [10] Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, et al. 120 nm bandwidth noise-like pulse generation in an erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(1): 157–161.
- [11] Zheng X W, Lou Z C, Liu H, et al. High-energy noise-like rectangular pulse in a passively mode-locked figure-eight fiber laser [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(4): 042701.
- [12] Deng Z S, Zhao G K, Yuan J Q, et al. Switchable generation of rectangular noise-like pulse and dissipative soliton resonance in a fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4517–4520.
- [13] Wang X D, Zhao N, Liu H, et al. Experimental investigation on Q-switching and Q-switched mode-locking operation in gold nanorods-based erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(8): 081401.
- [14] Wang Z T, Zhu S E, Chen Y, et al. Multilayer graphene for Q-switched mode-locking operation in an erbium-doped fiber laser [J]. *Optic Communications*, 2013, 300: 17–22.
- [15] Wang L Y, Xu W C, Luo Z C, et al. Passively Q-switched mode-locking erbium-doped fiber laser with net normal dispersion using nonlinear polarization rotation technique [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(10): 1808–1812.
- [16] Andrey Komarov, Hervé Leblond, Franéois Sanchez. Multistability and hysteresis phenomena in passively mode-locked fiber lasers [J]. *Physical Review A*, 2005, 71(5): 053809.