

激光与光电子学进展

L 波段调 Q 锁模类噪声方波脉冲光纤激光器

潘婕妤, 耿旭, 孙梦秋, 汪徐德*

淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000

摘要 报道了 L 波段掺铒光纤激光器中调 Q 锁模类噪声方波脉冲的演化特性。通过改变泵浦功率以及偏振状态, 激光器可以在 1600 nm 处实现类噪声方波脉冲的连续波锁模和调 Q 锁模运作。类噪声方波脉冲基频锁模重复率为 1.64 MHz, 最大脉冲宽度为 17.51 ns。类噪声方波脉冲调 Q 锁模的重复率可从 8.14 kHz 调谐至 18.18 kHz, 调 Q 锁模包络宽度与方波脉冲宽度随泵浦功率演化趋势相反, 调 Q 包络的最高平均能量可达 1115.5 nJ, 包络内方波脉冲的最大平均能量可达 24.89 nJ, 方波脉冲的峰值功率维持在 1 W 左右。该实验结果有助于人们深入理解 L 波段调 Q 锁模类噪声方波脉冲的动力学特性。

关键词 激光器; 光纤激光器; 非线性偏振旋转; 类噪声方波脉冲; 调 Q 锁模

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1314003

Q-Switched Mode-Locked Rectangular Noise-Like Pulse in L-Band Fiber Laser

Pan Jieyu, Geng Xu, Sun Mengqiu, Wang Xude*

School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, Anhui, China

Abstract The evolution characteristics of Q-switched mode-locked rectangular noise-like pulses were studied in an L-band erbium-doped fiber laser. By varying the pump power and polarization state, continuous-wave and Q-switched mode-locked based on rectangular noise-like pulses with 1600 nm central wavelength were realized in the fiber laser. The fundamental repetition rate and the maximum pulse width of the rectangular noise-like pulse were 1.64 MHz and 17.51 ns, respectively, and the repetition rate of the Q-switched mode-locked rectangular noise-like pulse could be tuned in the range of 8.14–18.18 kHz. The evolution trend of the Q-switched envelope width was opposite to that of the rectangular pulse width. The maximum average energy of the Q-switched envelope and the rectangular pulse inside the Q-switched envelope reached 1115.5 nJ and 24.89 nJ, respectively. The average peak power of the rectangular pulse was maintained at approximately 1 W. These results may aid in understanding the dynamic characteristics of Q-switched mode-locked rectangular noise-like pulses in L-band fiber lasers.

Key words lasers; fiber laser; nonlinear polarization rotation; rectangular noise-like pulse; Q-switched mode-locked

1 引言

超短脉冲激光在光纤通信、精密加工、生物医学、军用雷达等领域有着重要的应用价值及发展前景^[1]。被动锁模光纤激光器因结构简单, 激光腔内无需加入任何的主动器件可以产生超短脉冲的特点而备受关注^[2]。被动锁模的实现方法有两种, 一种是利用真实

可饱和吸收体如拓扑绝缘体、过渡金属硫化物等^[3-4]; 另外一种是利用类可饱和吸收体, 如非线性环路反射镜、非线性偏振旋转(NPR)^[5-6]。其中, 基于非线性偏振旋转锁模的光纤激光器具有结构简单、响应快速以及损伤阈值高等优点, 引起了人们的广泛关注和研究, 成为目前产生超短脉冲的有效方法。到目前为止, 人们已经在各种波长(如 1 μm, 1.5 μm 和 2.0 μm)光纤

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-08-10; 录用日期: 2021-08-17

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目(2008085MF211)、安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2019034)、安徽省教学研究项目(2019jyxm0213)、安徽省线上教学优秀课堂(2020xskt440)、安徽省教学示范课(光通信技术基础)、淮北师范大学研究生教育实践基地项目(2019jdxm05)、淮北师范大学研究生创新基金(CX2022035)

通信作者: *wangxudemail@126.com

激光器中获得锁模脉冲,随着应用需求的拓展,传统 C 波段(1530~1565 nm)的有关研究逐渐地延伸到 L 波段(1565~1625 nm),L 波段激光光源在密集波分复用系统、生物医疗和大气遥感探测等领域有着重要的应用^[7-8],现已逐渐成为研究热点^[9]。

一般来说,光纤激光器中主要存在三种工作状态:调 Q、连续波锁模以及调 Q 锁模(QML)。其中,QML 状态因其能获得高能量的脉冲而受到重视。QML 包含了两种光强度调制的机制:锁模和调 Q,其特征为锁模脉冲序列上叠加了一个 kHz 量级的调 Q 包络,因此 QML 脉冲兼具调 Q 和锁模操作的物理特性^[10-12]。除了调 Q 和调 Q 锁模外,通过适当调节激光腔内的参数,在非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器中还获得了多种类型的锁模脉冲,如传统孤子、色散管理孤子、耗散孤子、类噪声脉冲等^[13-15]。与其他的孤子脉冲不同,类噪声脉冲是一种部分相干脉冲,本质上是由大量的随机次脉冲构成的波包。类噪声脉冲具有很宽且平滑的光谱,其自相关迹表现为双尺度的时域轮廓,即一个窄的相干峰位于很宽的基座上^[16]。与传统孤子脉冲相比,类噪声脉冲具有更高的脉冲能量,特别是方波类噪声脉冲,其能量可高达 μJ 量级,脉冲宽度可随泵浦功率的增加而展宽^[17]。基于这一优势,人们对方波类噪声脉冲及其动力学行为进行了大量的实验研究,如谐波方波类噪声脉冲产生^[18]、方波类噪声脉冲与孤子分子共存^[19]、矩形类噪声脉冲与高斯形类噪声脉冲共存^[20]、方波类噪声脉冲与耗散孤子共振共存^[21],以及双波长方波类噪声脉冲可切换操作^[22]等。尽管已有很多关于 QML 和方波类噪声脉冲的相关报道,但将两个工作状态相结合的研究还很少。因此,更好地理解光纤激光器中的脉冲动力学行为,对 QML 方波类噪声脉冲的研究具有重要意义。

本文报道 L 波段掺铒光纤激光器中 QML 类噪声方波脉冲的演化特性。通过适当调节腔参数,激光器可以在 1600 nm 处实现类噪声方波脉冲的连续波锁模和 QML 运作。当泵浦功率从 380 mW 增大到 520 mW 时,激光器工作在类噪声锁模区域,脉冲宽度可从 12.71 ns 展宽到 17.51 ns。当泵浦源功率从 180 mW 增大到 360 mW 时,激光器工作在类噪声方波 QML 区域,调 Q 包络宽度从 12.56 μs 减小至 7.94 μs ,而方波脉冲宽度从 12.73 ns 展宽至 24.77 ns,包络宽度与方波脉冲宽度演化趋势相反,同时还对 QML 类噪声方波脉冲的平均输出能量和峰值功率进行了分析。该研究结果有助于加深对类噪声方波脉冲及其调 Q 锁模机理和特性的理解。

2 实验装置

图 1 为调 Q 锁模方波类噪声脉冲光纤激光器原理示意图。总腔长为 125.3 m,基频重复率为 1.64 MHz。为了实现 L 波段激光输出,在激光腔内加入一段 4 m 长的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,掺铒光纤的色散系数为 $-18 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。激光腔内其他光纤为普通单模光纤(SMF),色散值为 $17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。两个偏振控制器(PC1 和 PC2)用于调节光的偏振态,并与偏振相关隔离器(PD-ISO)一起构成非线性偏振旋转结构以实现锁模,同时偏振相关隔离器还可以用来保障光在激光腔中单向运行。泵浦源为 980 nm 的台式半导体激光器,最大输出功率为 520 mW,通过 980/1550 nm 的波分复用器(WDM)对 4 m 长的掺铒光纤进行泵浦。输出端口为一个 80:20 的光纤耦合器,将 20% 的光信号输出到腔外用于检测。光谱和脉冲序列分别用光谱仪与示波器来记录,脉冲宽度用自相关仪来测量,锁模脉冲的射频(RF)谱用 1.8 GHz 的射频谱仪探测。

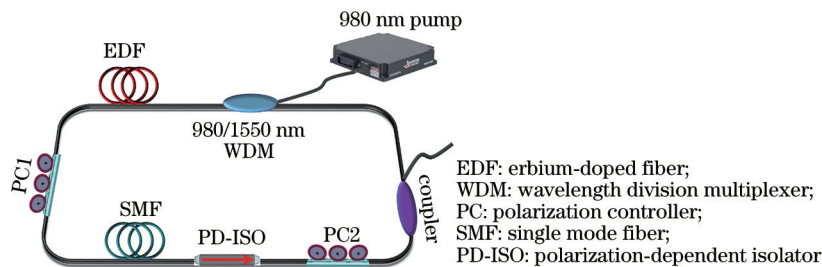


图 1 基于 NPR 锁模光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for mode-locked fiber laser based on NPR

3 实验结果

3.1 传统孤子锁模

在实验中,当泵浦源输出功率为 120 mW 时,激光器可以实现传统孤子锁模脉冲输出,锁模光谱如图 2(a)所示,几组边带对称分布在光谱两侧,其中心波长为 1600 nm,3 dB 带宽为 2.85 nm。对应的脉冲序列由示波器测得如图 2(b)所示,脉冲序列排列整齐,强度无

明显波动,说明激光器运作在稳定锁模状态,相邻脉冲之间的间隔为 0.61 μs ,相应基频为 1.64 MHz,对应激光腔长为 125.3 m。孤子脉冲的自相关迹如图 2(c)所示,假设脉冲为双曲正割型,则脉冲宽度为 2.6 ps,可以计算出时间带宽积约为 0.92,说明该脉冲带有大量的啁啾。图 2(d)为该脉冲对应的射频谱,脉冲的信噪比为 47 dB,峰值位于 1.64 MHz 处,与激光腔的重复率 1.64 MHz 相吻合。

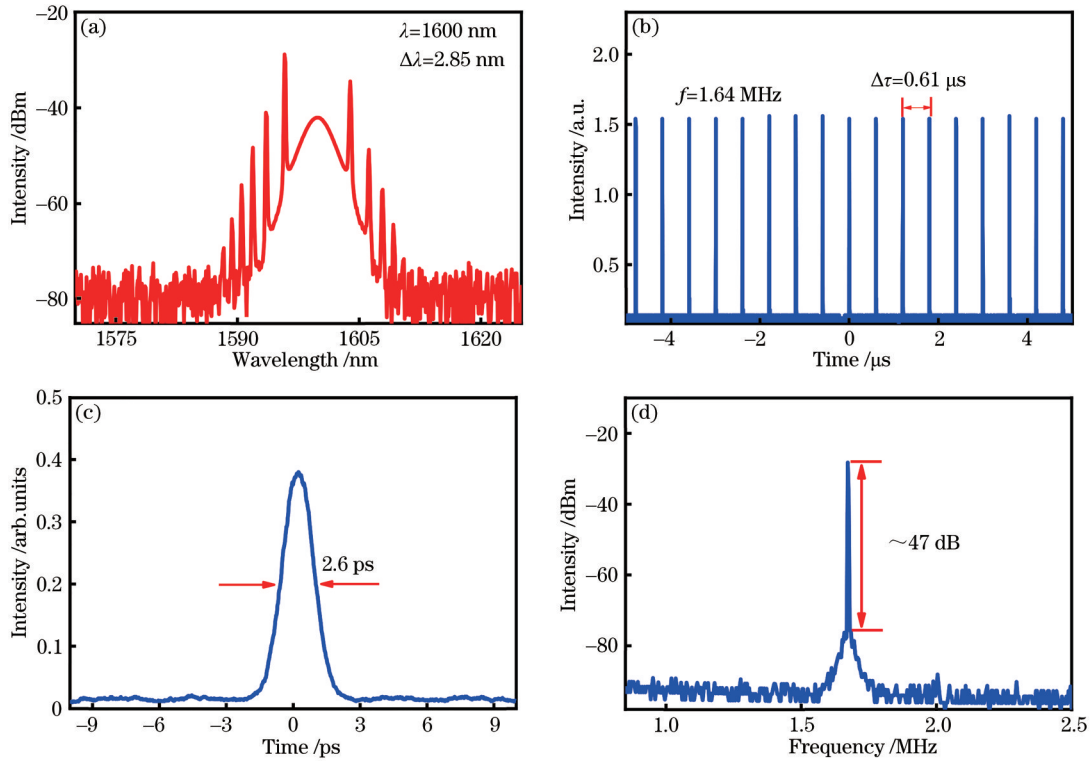


图 2 传统孤子锁模。(a)光谱;(b)脉冲序列;(c)自相关迹;(d)射频谱

Fig. 2 Traditional soliton mode locking. (a) Spectrum; (b) pulse train; (c) autocorrelation trace; (d) RF spectrum

3.2 类噪声方波

在孤子锁模运作的基础上,继续升高泵浦功率并调节偏振控制器,当泵浦功率超过 360 mW 时,锁模状态

很容易从传统锁模切换到方波类噪声锁模。图 3(a)为 520 mW 时典型的类噪声锁模光谱,可以看到光谱非常光滑,其中心波长仍处在 1600 nm 的位置,3 dB 带宽

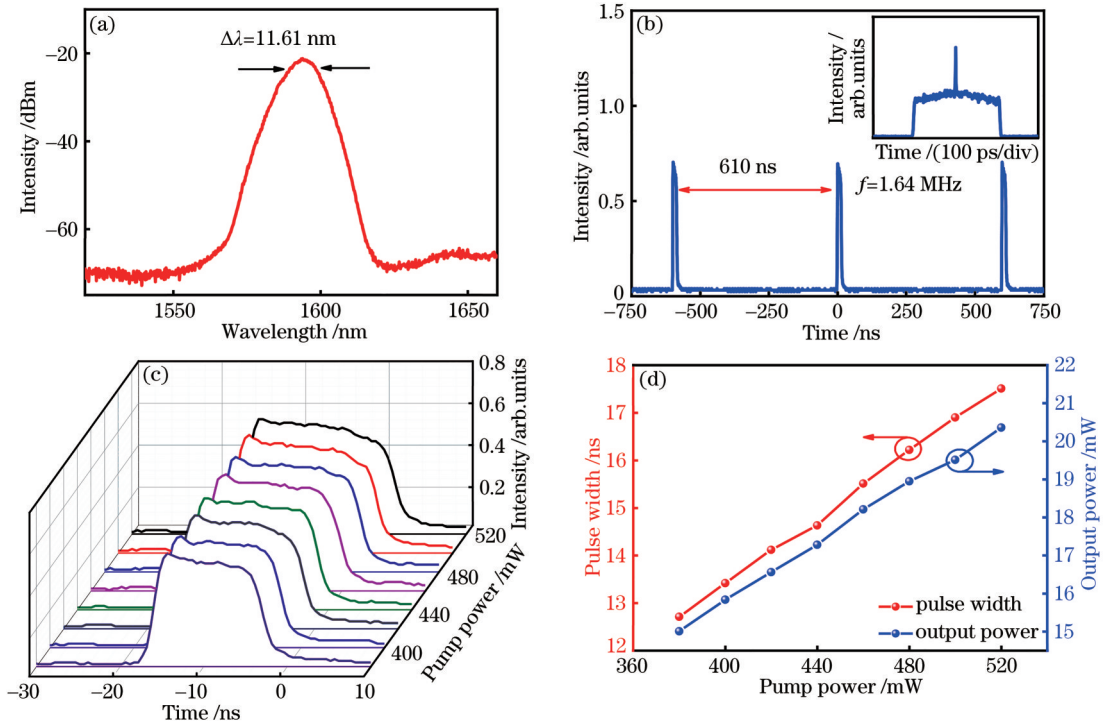


图 3 类噪声方波脉冲。(a)光谱;(b)脉冲序列(插图:自相关迹);(c)脉冲随着泵浦源功率的演化;(d)脉冲宽度和输出功率随着泵浦功率的变化

Fig. 3 Rectangular noise-like pulse. (a) Spectrum; (b) pulse train (inset: autocorrelation trace); (c) pulse evolution versus pump power; (d) pulse width and energy versus pump power

展宽至 11.61 nm, 此时激光腔工作在 L 波段。图 3(b) 中脉冲序列之间的距离为 610 ns, 对应脉冲重复率为 1.64 MHz。从插图中的自相关轨迹可以清楚地看到, 自相关曲线包含了一个大的能量底座和一个很窄的尖峰, 符合类噪声脉冲的特点^[23]。图 3(c) 给出了脉冲随泵浦功率变化的演化图, 随着泵浦功率的增加, 脉冲的宽度也逐之增大, 并且在展宽的过程中脉冲保持矩形轮廓不变。脉冲宽度和输出功率随着泵浦功率变化的量化曲线如图 3(d) 所示, 当泵浦功率从 380 mW 增大到 520 mW 时, 脉冲宽度从 12.71 ns 展宽到 17.51 ns, 同时输出功率由 15.01 mW 逐渐增至 20.36 mW。

3.3 调 Q 锁模

降低泵浦功率至 360 mW, 同时缓慢调节偏振控制器, 由于偏振态的变化导致了腔内增益和损耗的改变, 因此腔内锁模运作由方波类噪声脉冲锁模切换至稳定的 QML。QML 为连续波锁模和调 Q 运作的居间状态, 兼具有锁模和调 Q 运作的特性, 典型的特征为 kHz 的调 Q 包络叠加在 MHz 的锁模脉冲序列之上。为了更好地探究类噪声 QML 脉冲的特点, 图 4 给出了泵浦功率为 360 mW、300 mW、240 mW、180 mW 时调 Q 锁模脉冲的演化图, 可以清楚地观察到随着泵浦源功率的下降, 调 Q 包络的重复率逐渐降低, 而单个调 Q 包络宽度是逐渐增大的, 符合调 Q 脉冲的演化规律。为了清晰地观察调 Q 锁模脉冲的内部结构, 我们在示波器中观察放大的单个 QML 脉冲, 可以看到 QML 脉冲由一组间隔为 1.64 MHz 的锁模脉冲序列组成, 且单个的锁模脉冲呈矩形轮廓。随着泵浦功率从 360 mW 降低到 180 mW, 单个方波脉冲的脉宽逐渐变窄, 由 24.77 ns 逐渐降低至 12.73 ns。图 5 的实验结果清晰地显示, 激光器工作在方波脉冲 QML 状态, 当泵浦功

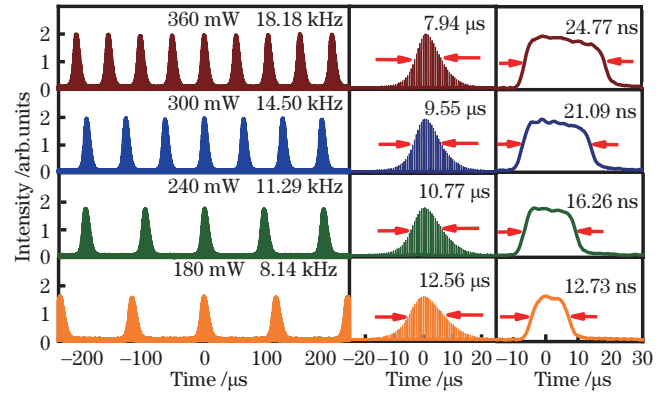


图 4 不同泵浦功率下的调 Q 锁模类噪声方波

Fig. 4 Q-switched mode-locked rectangular noise-like pulses under different pump powers

率逐渐降低时, QML 脉冲包络的宽度及其内部方波脉冲的宽度变化相反, QML 包络宽度随泵功率降低而变宽, 方波脉冲宽度则随之而减小。

图 5(a) 给出了方波 QML 在泵浦源功率为 360 mW、300 mW、240 mW、180 mW 时, 对应的光谱演化图。与图 3(a) 方波类噪声锁模的光滑光谱不同, 方波 QML 的光谱上出现调制, 且随着泵浦源功率的降低光谱的调制程度加深, 这种现象应该是腔内的多模振荡和腔内微扰造成的^[24]。值得注意的是, 在两个运作区域, 光谱的中心波长保持不变, 仍位于 1600 nm, 光谱 3 dB 带宽变化不明显。图 5(b) 给出了 QML 状态的自相关迹, 与图 3(b) 中类噪声的自相关迹很相似, 一个很窄的相干峰坐落在很宽的基座之上, 因此激光器此时运作状态称为类噪声方波 QML 状态。另外, 在自相关迹的基座上可观察到周期性的振荡, 我们推测可能是脉冲振幅规律性波动引起的。

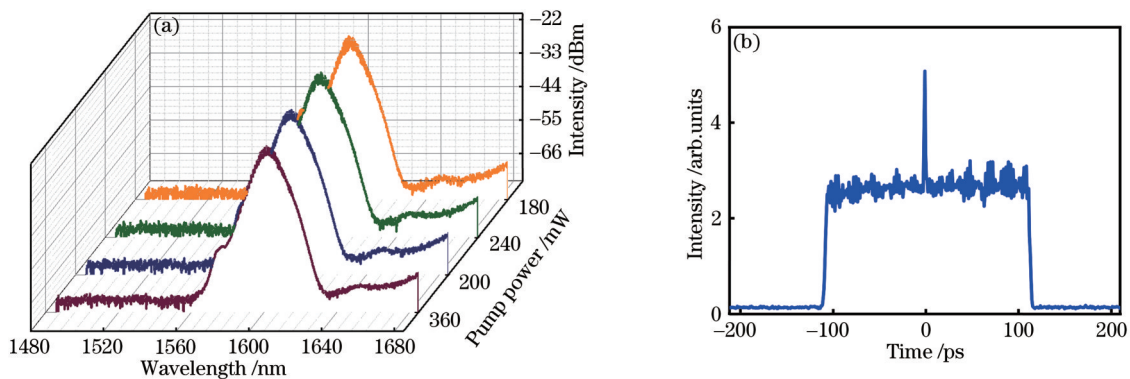


图 5 实验结果。(a) 光谱演化图; (b) 自相关迹

Fig. 5 Experimental results. (a) Spectral evolution; (b) autocorrelation trace

为了定量研究 QML 类噪声方波脉冲的特性, 脉冲各参数随泵浦功率变化关系如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出, 调 Q 包络的重复率和输出功率随着泵浦功率的变化呈线性变化。随着泵浦功率的增大, 包络重复率从 8.14 kHz 可调谐至 18.18 kHz, 输出功率从 6.29 mW 逐渐增加至 20.28 mW。图 6(b) 给出了单个

调 Q 锁模包络宽度及方波脉冲宽度的变化情况, 可以观察到, 泵浦功率在 180 mW 至 360 mW 的范围内, 包络宽度从 12.56 μs 线性减小至 7.94 μs, 而单个方波脉冲宽度从 12.73 ns 增加至 24.77 ns, 变化趋势相反。QML 包络的平均能量、QML 类噪声方波脉冲的平均能量以及 QML 类噪声方波脉冲的峰值功率表示为

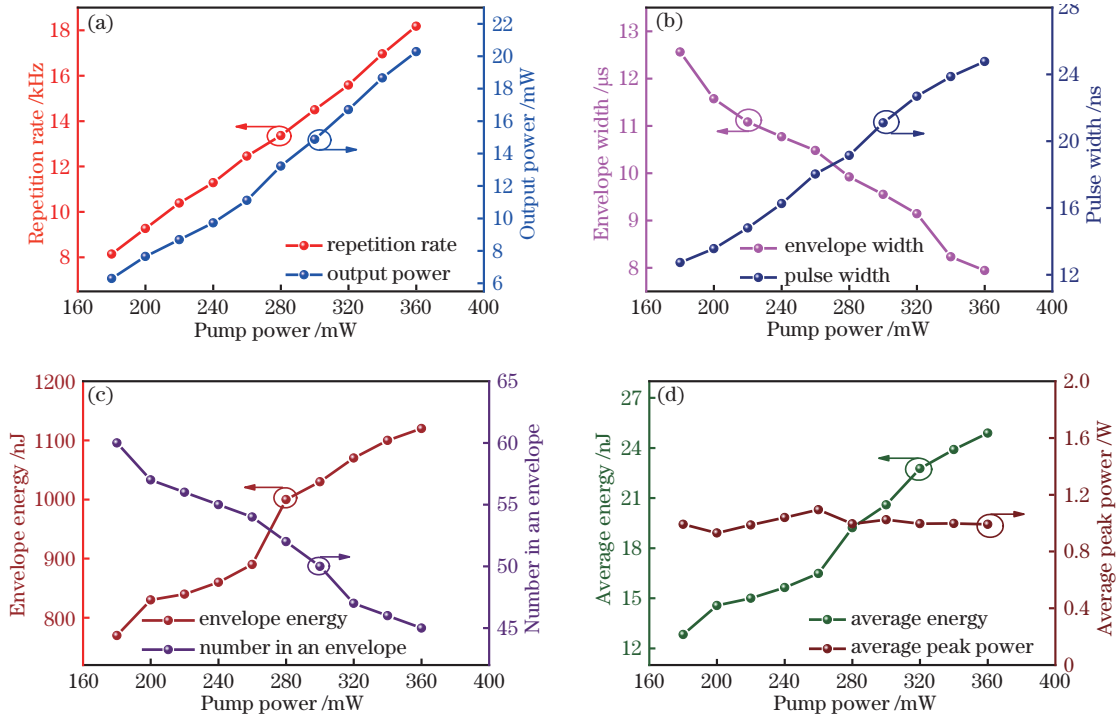


图 6 调 Q 锁模类噪声方波脉冲特性的变化。(a) 重复率和输出功率随着泵浦功率的变化; (b) 包络的宽度和脉冲宽度随着泵浦功率的变化; (c) 单个包络的能量和包络中脉冲数随着泵浦功率的变化; (d) QML 类噪声方波脉冲的平均能量及其峰值功率随着泵浦功率的变化

Fig. 6 Variation of Q-switched mode-locked rectangular noise-like pulses characteristics. (a) Repetition rate and output power versus pump power; (b) envelope width and pulse width versus pump power; (c) energy of a single envelope and number of pulse in envelope versus pump power; (d) average energy and peak power of QML rectangular noise-like pulse versus pump power

$$E_Q = P/f, \quad (1)$$

$$E_{\text{pulse}} = E_Q/K, \quad (2)$$

$$P_{\text{peak}} = E_{\text{pulse}}/\tau, \quad (3)$$

式中: E_Q 是调 Q 包络的平均能量; P 是激光器输出功率; f 是对应的调 Q 包络的重复率; K 是调 Q 包络内所包含的单个脉冲的个数; E_{pulse} 是 QML 类噪声方波脉冲的平均能量; P_{peak} 是 QML 类噪声方波脉冲的平均峰值功率; τ 是调 Q 内部单个方波脉冲的宽度。从图 6(c) 和图 6(d) 可以看出, 随着泵浦功率的增大, 包络的平均能量从 770 nJ 增大到 1120 nJ, 包络中脉冲数由 60 减少至 45, QML 类噪声方波脉冲的平均能量从 12.83 nJ 增大到 24.89 nJ, 方波脉冲的平均峰值功率变化不明显, 维持在 1 W 左右。

众所周知, 在被动锁模光纤激光器腔中存在一个临界脉冲能量^[25], 低于临界脉冲能量, 激光器可以实现从连续波锁模到调 Q 锁模工作状态的转变。实验中, 通过调节泵浦功率, 光纤激光器在 1600 nm 处可以分别实现类噪声方波脉冲的连续波锁模和 QML 运作。当激光器工作在连续波锁模状态时, 类噪声锁模脉冲序列保持整齐一致的强度, 其重复率为 1.64 MHz, 与腔的重复率相匹配。当激光器工作在调 Q 锁模状态时, 对应于两个特征重复率, 一个是调 Q 包络的调制频率, 与激光上能级的粒子数周期变化有关, 另一个是包

络内锁模脉冲重复率, 与腔长有关。并且在两种运作状态下, 其内部锁模脉冲均保持为方形轮廓。方波的形成主要源于长腔引入的高非线性效应以及 NPR 诱导的峰值钳制效应。过度的腔内非线性效应有利于脉冲分裂而产生更多的随机子脉冲, 这些子脉冲通过彼此相互作用组成波包, 形成类噪声脉冲。当泵浦功率增大时, 脉冲进一步分裂, 导致了类噪声脉冲宽度随着泵浦功率的增加而展宽, 当大部分子脉冲具有相同的钳制峰值功率时, 类噪声脉冲波包呈现为方形轮廓。

4 结 论

本文搭建了一个基于 NPR 结构的被动锁模光纤激光器, 在波长 1600 nm 波段获得常规孤子锁模、类噪声方波锁模以及类噪声方波 QML 三种运作模式。当泵浦功率从 380 mW 增大到 520 mW, 激光器工作在类噪声锁模区域时, 脉冲宽度可从 12.71 ns 展宽到 17.51 ns, 输出功率从 15.01 mW 增至 20.36 mW。当泵浦源功率从 180 mW 增大到 360 mW, 激光器工作在类噪声方波 QML 区域时, 包络重复率可从 8.14 kHz 变化至 18.18 kHz, 包络宽度与方波脉冲宽度演化趋势相反, 包络宽度从 12.56 μs 减小至 7.94 μs, 而方波脉冲宽度从 12.73 ns 展宽至 24.77 ns。此外本文还研究了 QML 包络的平均能量、QML 类噪声方波脉冲的平均能量以及 QML 类噪声方波脉冲的峰值功率的变

化规律, 研究结果有利于加深对类噪声方波以及类噪声方波 QML 的理解, 并为设计具有不同方波脉冲性质的激光器提供参考。

参 考 文 献

- [1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [2] 董自凯, 宋晏蓉. 光纤激光器被动锁模技术研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 0501006.
Dong Z K, Song Y R. Research progress of mode-locked fiber lasers based on saturable absorbers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501006.
- [3] Luo Z Q, Huang Y Z, Weng J, et al. 1.06 μm Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi_2Se_3 as a saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29516-29522.
- [4] Woodward R I, Howe R C T, Hu G, et al. Few-layer MoS_2 saturable absorbers for short-pulse laser technology: current status and future perspectives[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A30-A42.
- [5] Li J F, Zhang Z X, Sun Z Y, et al. All-fiber passively mode-locked Tm-doped NOLM-based oscillator operating at 2 μm in both soliton and noisy-pulse regimes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7875-7882.
- [6] Oktem B, Ülgüdür C, İlday F Ö. Soliton-similariton fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 307-311.
- [7] Morin F, Druon F, Hanna M, et al. Microjoule femtosecond fiber laser at 1.6 μm for corneal surgery applications[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 1991-1993.
- [8] 王丽莎, 孙松松, 闫炜, 等. L波段可切换双波长高能量脉冲光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20200370.
Wang L S, Sun S S, Yan W, et al. L-band switchable dual-wavelength, high-energy pulsed fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200370.
- [9] 窦志远, 张斌, 刘帅林, 等. 高功率全光纤 1.6 微米类噪声方形脉冲激光器[J]. *物理学报*, 2020, 69(16): 164202.
Dou Z Y, Zhang B, Liu S L, et al. High-power 1.6 μm noise-like square pulse generation in an all-fiber mode-locked laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(16): 164202.
- [10] Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, et al. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(1): 46-56.
- [11] 车潇华, 徐杰, 李恒达, 等. 主动调 Q 次级拉曼模激光器的研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0614001.
Che X H, Xu J, Li H D, et al. Research on the actively Q-switched sub-Raman mode for Raman laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0614001.
- [12] 张凯龙, 陈浩伟, 陆宝乐, 等. 基于二硒化铋可饱和吸收体的被动调 Q 掺铒光纤激光器的研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1314001.
Zhang K L, Chen H W, Lu B L, et al. Passively Q-switched erbium-doped fiber laser based on HfSe_2 saturable absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1314001.
- [13] Ganapathy R. Soliton dispersion management in nonlinear optical fibers[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(12): 4544-4550.
- [14] Tang D Y, Man W S, Tam H Y, et al. Observation of bound states of solitons in a passively mode-locked fiber laser[J]. *Physical Review A*, 2001, 64(3): 033814.
- [15] 雷旬, 刘奇, 王煜, 等. 近衍射极限输出的大芯径尺寸晶体波导被动调 Q 脉冲激光器[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1214001.
Lei H, Liu Q, Wang Y, et al. Passively Q-switched pulse laser with large core size crystal waveguide near diffraction-limit beam quality output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1214001.
- [16] Liu H, Zheng X W, Zhao N, et al. Generation of multiwavelength noise-like square-pulses in a fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(19): 1990-1993.
- [17] Li C, Kong C H, Wong K K Y. High energy noise-like pulse generation from a mode-locked thulium-doped fiber laser at 1.7 μm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1505106.
- [18] Li Y H, Kang Y, Guo X, et al. Simultaneous generation of ultrabroadband noise-like pulses and intracavity third harmonic at 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1583-1586.
- [19] Huang Y Q, Hu Z A, Cui H, et al. Coexistence of harmonic soliton molecules and rectangular noise-like pulses in a figure-eight fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4056-4059.
- [20] Zhao G K, Chen H J, Liu H Z, et al. Coexistence of rectangular and Gaussian-shape noise-like pulses in a figure-eight fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 17804-17813.
- [21] Cheng Z C, Li H H, Wang P. Simulation of generation of dissipative soliton, dissipative soliton resonance and noise-like pulse in Yb-doped mode-locked fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5972-5981.
- [22] 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.
- [23] Wu C H, Yao Y, Wu Q C, et al. Evolutions of Q-switched mode-locked square noise-like pulse with different cavity lengths[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3641-3646.
- [24] Li K X, Tian J R, Guoyu H Y, et al. Observation of self-mode-locked noise-like pulses from a net normal dispersion erbium-doped fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(4): 045101.
- [25] Lin K H, Kang J J, Wu H H, et al. Manipulation of operation states by polarization control in an erbium-doped fiber laser with a hybrid saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4806-4814.