

孤子分子/类噪声脉冲可切换的混合锁模光纤激光器

赵铭 王天枢

Switchable soliton molecules and noise-like pulses in hybrid mode-locking fiber laser

ZHAO Ming, WANG Tianshu

引用本文:

赵铭, 王天枢. 孤子分子/类噪声脉冲可切换的混合锁模光纤激光器[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 456–461. DOI: 10.5768/JAO202344.0208001

ZHAO Ming, WANG Tianshu. Switchable soliton molecules and noise-like pulses in hybrid mode-locking fiber laser[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 456–461. DOI: 10.5768/JAO202344.0208001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于类噪声脉冲抽运的平坦超连续谱光源

Flat super-continuum spectrum light source based on noise-like pulse pumping

应用光学. 2021, 42(4): 743–748 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0405002>

位于第三近红外窗口的平坦光纤超连续谱产生

Flat fiber super-continuum spectrum generation in the third near-infrared window

应用光学. 2021, 42(3): 565–570 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308002>

高信噪比多波长2 μm主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>

基于多波长类噪声脉冲的掺铒光纤激光器

Multi-wavelength noise-like pulsed erbium-doped fiber laser

应用光学. 2019, 40(4): 710–716 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0408003>

色散管理掺铥光纤激光器高能量脉冲的产生

Generation of high-energy pulses in dispersion-managed Tm-doped fiber laser

应用光学. 2019, 40(4): 551–556 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0456-06

孤子分子/类噪声脉冲可切换的混合锁模光纤激光器

赵 铭¹, 王天枢²

(1. 厦门大学嘉庚学院 信息科学与技术学院, 福建 漳州 363105; 2. 长春理工大学 空间光电技术
国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘 要: 不同类型脉冲之间的演化是被动锁模光纤激光器丰富动力学的体现。报道了一种可实现多种脉冲切换的混合锁模光纤激光器, 当泵浦功率为 400 mW 时实现了孤子分子、谐波锁模、孤子簇之间的相互切换。增加泵浦功率至 600 mW 时获得了类噪声脉冲输出, 对应的输出功率和单脉冲能量分别为 15.2 mW 和 0.86 nJ。通过调节偏振控制器实现了类噪声脉冲中心波长从 1 895 nm 到 1 930 nm 可调谐。所搭建的激光器具有锁模脉冲可切换, 波长可调谐, 能自启动等优点。

关键词: 光纤激光器; 混合锁模; 孤子分子; 类噪声脉冲; 波长可调谐

中图分类号: TN242

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0208001

Switchable soliton molecules and noise-like pulses in hybrid mode-locking fiber laser

ZHAO Ming¹, WANG Tianshu²

(1. School of Information Science and Technology, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou 363105, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The evolution between different types of pulses is the embodiment of the passive mode-locking fiber laser rich dynamics. A hybrid mode-locking fiber laser with multiple pulse switching was reported. When the pump power was 400 mW, the mutual switch of pulses between soliton molecules, harmonic mode-locking and soliton clusters were realized. Then, when the pump power was increased to 600 mW, the noise-like pulse output was realized, and the corresponding output power and single pulse energy were 15.2 mW and 0.86 nJ, respectively. By adjusting the polarization controller, the central wavelength of noise-like pulse could be tuned from 1 895 nm to 1 930 nm. The designed laser has the advantages of mode-locking switching, wavelength tuning and automatic start.

Key words: fiber laser; hybrid mode-locking; soliton molecules; noise-like pulses; wavelength tuning

引言

近年来, 由于 2 μm 超快光纤激光器优异的性能使其在光通信^[1]、激光医疗^[2]、激光加工^[3]和中红外光源的产生^[4]等多个领域得到了广泛的应用。作为一种体积小、重量轻、性能稳定的超快光源, 被动锁模光纤激光器已经被证实能够在多种不同锁模结构下工作^[5-8]。当激光器腔内净色散为负时, 在色散效应和非线性效应的共同作用下可以形成传统孤子^[9]。但受到孤子面积理论的限制,

使得传统孤子的单脉冲能量一般小于 0.1 nJ。继续增大泵浦功率, 传统孤子受峰值功率钳制效应的影响发生分裂形成两个或多个脉冲。与物质的原子类似, 腔内传输的离散脉冲也可以表现得像粒子一样受到彼此间作用力的影响, 从而演化为不同类型的脉冲。分裂后的脉冲根据孤子间作用力的不同又可以分为谐波锁模^[10]、孤子雨^[11]、脉冲簇^[12]和束缚态^[13]等, 其中在负色散区形成的束缚态又称为孤子分子。在被动锁模光纤激光器中利

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61975021)

作者简介: 赵铭 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事超快光纤激光器研究。E-mail: 290182477@qq.com

通信作者: 王天枢 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事无线光通信、光纤激光器研究。E-mail: wangts@cust.edu.cn

用谐波锁模原理, 可以使激光器工作的重复频率高达 GHz, 用来作为高分辨率的光频梳光源^[14-15]。由于脉冲簇和束缚态孤子脉冲的紧凑性与独立性, 可作为光通信的载体用来提高信息的传输速率^[16]。类噪声脉冲在时域上表现为由数百甚至上千个持续时间为飞秒量级的脉冲聚集而形成的宽度为数百皮秒的基座, 并在顶部具有一个尖的相干峰, 因而, 类噪声脉冲往往具有较高的脉冲能量^[17]。类噪声脉冲的形成与腔内色散正负值无关, 但在不同色散区域类噪声的形成机理不同。例如在负色散区类噪声的形成和孤子的坍塌效应有关, 在正色散区类噪声脉冲的形成与色散和锁模机制的峰值功率钳制效应有关。

由于光纤激光器具有丰富的脉冲动力学和潜在的应用价值, 使得人们对产生不同类型的孤子及其之间切换的研究表现出了极大的兴趣。通过设计合适的激光器结构, 在激光器中引入不同类型脉冲的形成条件, 可以在同一激光器中实现不同类型锁模脉冲之间的切换和共存^[18]。2013 年, Mao 等人在基于半导体可饱和吸收镜锁模掺铒光纤激光器中利用啁啾布拉格光纤光栅对波长的选择透过性, 使光纤激光器结构中存在 2 个不同长度的循环腔, 实现了传统孤子和耗散孤子双波长锁模^[19]。2017 年, Wang 等人在掺铒光纤激光器中通过改变腔内的相位延迟, 实现了类噪声脉冲和谐波孤子共存锁模^[20]。2020 年, Liu 等人采用双向泵浦, 在基于非线性偏振旋转锁模掺铒光纤激光器中利用双折射效应得到了稳定的传统孤子和不稳定的调制孤子共存^[21]。2020 年, Zhao 等人在基于非线性偏振旋转锁模掺铒光纤激光器中补偿腔内色散到正色散区, 通过调节腔内偏振控制器和泵浦功率, 获得了可切换的耗散孤子和类噪声锁模^[22]。这些工作实现了不同类型脉冲之间的切换和共存, 研究了不同类型脉冲的演化过程, 对进一步探索被动锁模光纤激光器中丰富的脉冲动力学理论具有重要意义。如果当腔结构存在 2 种不同的锁模结构共同作用于脉冲的形成过程时, 腔内会形成什么样的脉冲, 以及当改变腔内参数时脉冲会发生怎样的演化, 这是一个值得研究的内容。

本文提出了一种能实现多种脉冲之间可切换的混合锁模光纤激光器。当泵浦功率为 400 mW 时, 在 1 900 nm 处获得了孤子分子锁模, 随后通过调节偏振控制器在 1 912 nm 处分别获得了 2 阶谐波锁模和孤子簇。此外, 当泵浦功率增加到 600 mW

时获得了类噪声锁模, 其中心波长可以从 1 895 nm 调谐到 1 930 nm, 可调谐范围为 35 nm。因为半导体可饱和吸收镜属于真实材料可饱和吸收体, 其锁模的原理并不依赖腔内的偏态, 而是基于其材料结构对强光透过和对弱光吸收来达到窄化脉冲的作用, 从而实现超短脉冲输出。所以, 在腔内加入半导体可饱和吸收镜作为慢可饱和吸收体, 不仅增强了光纤激光器系统的稳定性, 而且还能实现激光器在输出任何脉冲状态下的自启动。该激光器具有结构简单, 锁模模式可切换, 波长可调谐和自启动等优点。

1 系统结构

基于非线性偏振旋转和半导体可饱和吸收镜混合锁模的 2 μm 光纤激光器实验结构如图 1 所示。波长为 1 553 nm 的半导体激光光源经过掺铒光纤激光放大器放大后通过 1 个 1 550 nm/2 000 nm 的波分复用器耦合进入 1.7 m 的铽钛共掺光纤, 该增益光纤在 1 550 nm 处的吸收效率为 13 dB/m。由 2 个三环的偏振控制器和 1 个偏振相关隔离器构成的全光纤非线性偏振旋转结构是腔内的一种锁模结构; 腔内的另一个锁模结构是由环形器的 2 号端口接入腔内的半导体可饱和吸收镜(BATOP SAM 2000-36-10ps-x)。由于半导体可饱和吸收镜的工作机理与腔内偏振态无关, 因此, 半导体可饱和吸收镜对脉冲窄化时不会受到腔内偏振态的影响。采用 30:70 的光纤耦合器的 30% 端口作为输出。腔内所有器件的尾纤均为普通单模光纤(Cor-

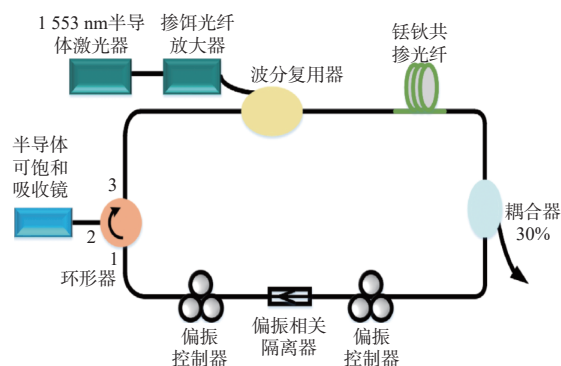


图 1 基于非线性偏振旋转和半导体可饱和吸收镜混合锁模结构的 2 μm 光纤激光器

Fig. 1 Structure diagram of 2 μm fiber laser based on hybrid mode-locking structure of nonlinear polarization rotation and semiconductor saturable absorber mirror

ning SMF-28e), 总腔长为 9.2 m。铥钛共掺光纤和普通单模光纤在 2 000 nm 处的群速度色散分别为 $-73.7 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $-85 \text{ ps}^2/\text{km}$, 表明激光器工作在负色散区。

实验中的光谱由分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)观测。时域信号和频谱信号由 12 GHz 的光电探测器将光信号转换为电信号后分别输入 2.5 GHz 的示波器(agilent infiniiium DSO9254A)和频谱信号分析仪(agilent N1996A)进行观测, 脉冲宽度采用基于二次谐波测量法的自相关仪器(FR-103XL)进行测量。

2 实验结果与讨论

2.1 孤子分子/谐波锁模/孤子簇之间的切换

在实验室中, 当泵浦功率增加到 400 mW 时通过调节腔内 2 个偏振控制器可以得到孤子分子锁模, 此时对应的输出功率为 2.5 mW。由于泵浦功率迟滞效应, 当泵浦功率逐渐降低至 350 mW 时, 依然可以维持稳定的孤子分子锁模。当泵浦功率为 400 mW 时, 对输出激光特性做了测量, 其光谱如图 2(a) 所示, 中心波长为 1 900 nm, 调制周期为 6 nm。光谱中心波长两侧不同强度的凯利边带是由于铥钛增益光纤在该波长范围处的增益不平坦性和 NPR 结构产生的双折射滤波效应共同导致的^[23]。图 2(b) 为输出激光的脉冲序列, 显示 2 个相邻脉冲之间的间距为 45 ns。图 2(c) 为脉冲自相关轨迹, 3 个强度比为 1 : 2 : 1, 且具有相同宽度的自

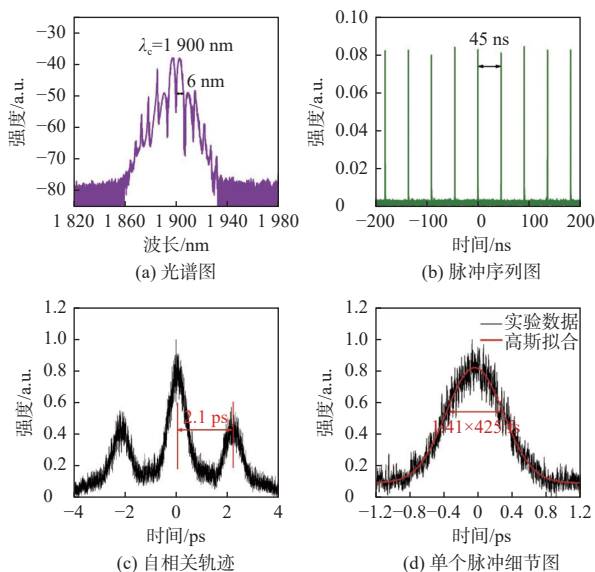


图 2 孤子分子锁模

Fig. 2 Soliton molecules mode-locking

相关轨迹表明输出脉冲为孤子分子。2 个束缚在一起的脉冲间距为 2.1 ps, 与根据公式 $\Delta t = \lambda_c^2 / c \Delta \lambda$ 计算得到的束缚脉冲之间的间距 2 ps 接近。其中, λ_c 为输出激光中心波长; c 为光速; $\Delta \lambda$ 为光谱的调制周期。图 2(d) 为自相关轨迹中中间脉冲的细节图, 采用高斯函数对其拟合后测得其脉宽为 425 fs。图 3(a) 显示了扫描分辨率为 100 Hz, 扫描范围为 14 MHz~28 MHz 时的频谱图, 其频率为 22.2 MHz, 信噪比大于 44 dB。其中 22.2 MHz 与腔长 9.2 m 相对应, 表明激光器工作在基本重复频率锁模状态。图 3(b) 为扫描分辨率为 1 kHz, 扫描宽度为 1 GHz 时的频谱, 表明孤子分子锁模状态具有良好的稳定性。

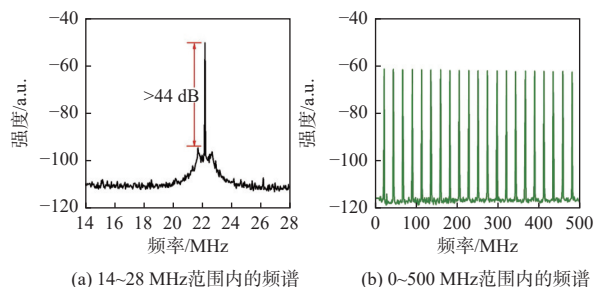


图 3 孤子分子频谱

Fig. 3 Frequency spectra of soliton molecules

在获得稳定的孤子分子锁模后, 大范围调节腔内偏振控制器可以分别获得 2 阶谐波锁模和孤子簇。图 4(a) 为 2 阶谐波锁模的光谱图, 其中心波长为 1 912 nm, 光谱两边仍然具有明显的凯莉边带。但与图 2(a) 不同是, 此时光谱不再被周期性地调制。图 4(b) 为对应的锁模脉冲序列, 相邻 2 个脉冲之间的时间间隔为 22.2 ns, 表明激光器工作在 2 阶锁模状态。在 2 阶谐波锁模的基础上轻微地调节腔内偏振控制器, 示波器上的锁模脉冲序列开始变得不稳定, 随后演变为孤子簇, 其光谱如图 5(a) 所示, 孤子簇脉冲中心波长为 1 912 nm。图 5(b)

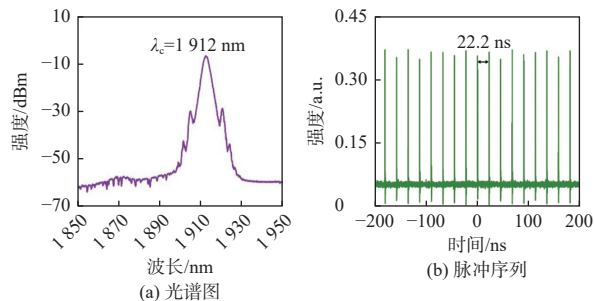


图 4 谐波锁模

Fig. 4 Harmonic mode-locking

为对应的脉冲序列, 显示一个锁模时间周期内共有 3 个脉冲, 其中 1 个脉冲幅值较高, 另外 2 个脉冲幅值较低, 且这 3 个脉冲紧紧的束缚在一起。需要说明的是, 当激光器输出稳定的 3 脉冲孤子簇时, 此时轻微地调节偏振控制器, 在示波器上 3 脉冲孤子簇会演变为更多脉冲的孤子簇, 但他们的光谱形状几乎一样。

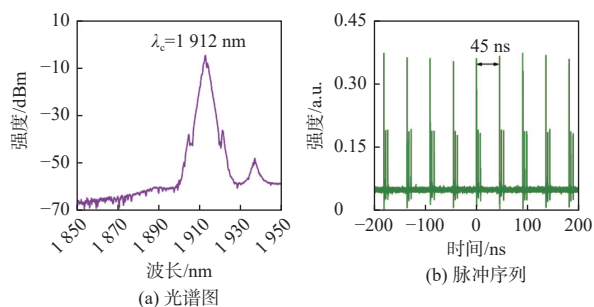


图 5 孤子簇

Fig. 5 Soliton clusters

激光器分别在 1900 nm 和 1912 nm 不同波长处获得稳定锁模的原因主要是: 调节偏振控制器改变了由腔内双折射引起的滤波效应, 从而对输出激光的波长进行选择。能够产生 3 种不同状态的脉冲是因为在调节偏振控制器的过程中改变了腔内的非线性相位延迟和腔内损耗, 又因为孤子的峰值功率受到腔线性相位延迟点的限制, 使激光器中的脉冲发生分裂形成多脉冲。由于孤子在工作状态与孤子间的作用力有关, 孤子间不同的作用力会产生不同类型的孤子脉冲。以往的研究表明, 被动锁模光纤激光器中孤子间的作用力主要有 3 种: 直接孤子间作用力、局部孤子间作用力和全局孤子作用力^[24-25]。当分裂脉冲之间的作用力由全局孤子作用力主导时, 腔内分裂形成的脉冲等间距均匀分布, 此时便形成谐波锁模。当分裂脉冲之间的作用力由直接孤子间作用力主导时, 便形成孤子分子锁模。局部孤子间作用力一般作用范围较大, 但孤子间作用力较弱, 对孤子簇锁模的形成起到了很重要的作用。

2.2 类噪声波长可调谐

继续增加泵浦功率至 600 mW 时, 轻微地调节腔内偏振控制器可以获得稳定的类噪声锁模, 此时对应的输出功率为 15.2 mW, 其光谱如图 6(a) 所示, 中心波长为 1885.2 nm, 3 dB 光谱带宽为 6.8 nm。图 6(b) 插图是通过自相关测得的脉冲轨迹, 可以看到很宽的底座上有一个突出的相干峰, 这是类

噪声脉冲典型的特性。图 6(b) 为将所得到的相干峰进行高斯拟合, 显示其脉宽为 444 fs。图 6(c) 为类噪声脉冲的频谱图, 在分辨率为 100 Hz, 扫描范围为 30 MHz 的情况下, 测得其重复频率为 22.2 MHz, 信噪比大于 60 dB, 计算得到对应的单脉冲能量为 0.68 nJ。图 6(c) 插图显示了扫描分辨率为 1 kHz, 扫描范围为 500 MHz 时的频谱, 表明激光器具有良好的时间稳定性。图 6(d) 为测量的脉冲序列, 2 个相邻脉冲之间的时间间隔为 45 ns, 与腔长 9.2 m 相对应, 表明激光器工作在基频锁模状态。

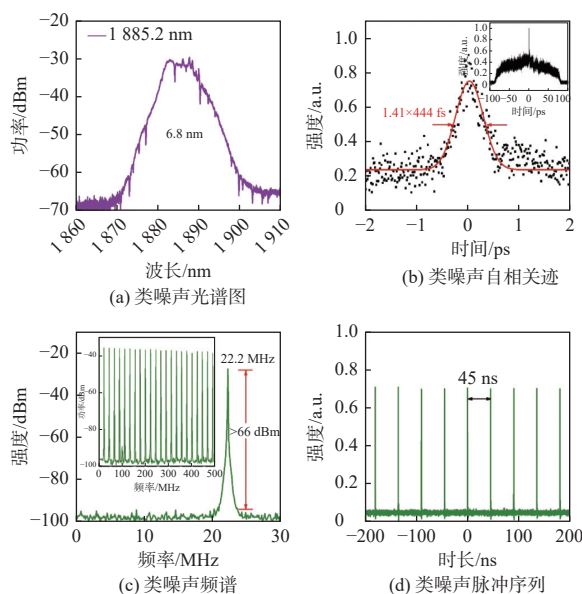


图 6 类噪声锁模

Fig. 6 Noise-like pulse mode-locking

此外, 通过仔细调节 2 个偏振控制器可得到波长可调谐的类噪声锁模, 调谐范围为 35 nm。从图 7(a) 观察到, 中心波长可以从 1895 nm 调谐到 1930 nm。在波长调谐的过程中, 类噪声光谱有轻

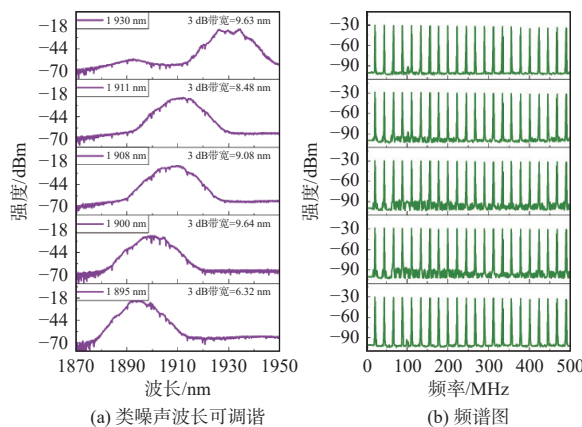


图 7 类噪声波长可调谐

Fig. 7 Noise-like pulse wavelength tuning

微的变形,这是由于铥铒共掺光纤在 2 μm 波段的增益不平坦性导致的。图 7(b) 为不同波长类噪声脉冲锁模对应的频谱,表示激光器在各个波长处的类噪声锁模都十分稳定。

这种波长可调谐的锁模现象可以用基于非线性偏振旋转的双折射滤波效应来解释^[26]。当光信号在具有非线性偏振旋转结构的激光腔内传输时,基于非线性偏振旋转的双折射滤波模型的透射函数可以表示为

$$T = \cos^2\theta_1 \cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_1 \sin^2\theta_2 + \frac{1}{2} \sin(2\theta_1) \sin(2\theta_2) \cos(\Delta\varphi_L + \Delta\varphi_{NL}) \quad (1)$$

式中: θ_1 为腔内传播的信号光通过偏振相关隔离器后的偏振方向与光纤快轴之间的夹角; 光信号经过 2 个偏振控制器后夹角变为 θ_2 ; $\Delta\varphi_L = 2\pi L(n_x - n_y)/\lambda$ 和 $\Delta\varphi_{NL} = 2\pi n_2 PL \cos(2\theta_1)/\lambda A_{\text{eff}}$ 分别表示腔内的线性相位延迟和非线性相位延迟; L 是光纤的长度; n_x 和 n_y 分别是光纤快轴和慢轴的折射率; P 为输入信号的瞬时功率; n_2 为非线性折射率; λ 为工作波长; A_{eff} 为有效模面积。从式(1)可以推断出,在非线性偏振旋转结构中,基于光纤双折射所产生的滤波效应导致光信号的透射函数 T 值可以随波长周期性变化,透射通道的间距和透射峰的强度与腔内的双折射有关。通过旋转和挤压偏振控制器可以改变腔内双折射和腔内净增益,又因铥铒共掺光纤增益带宽内的增益不平坦性,所以实现了输出脉冲波长在一定范围内的可调谐。

3 结论

本文提出了一种多种脉冲之间可切换的铥铒共掺混合锁模光纤激光器。当泵浦功率为 400 mW 时,调节腔内的偏振控制器可以实现中心波长为 1 900 nm 的孤子分子锁模、1 912 nm 的 2 阶谐波锁模和 1 912 nm 的孤子簇 3 种不同类型脉冲之间的切换。当泵浦功率为 600 mW 时,获得了波长可调谐的类噪声锁模,其中心波长调谐范围为 1 895 nm~1 930 nm。该锁模光纤激光器具有锁模脉冲可切换、波长可调谐、可自启动的优点,在生物医疗、光学加工、红外光谱的产生等领域具有广泛的应用价值。

参考文献:

[1] ZHANG Xinmeng, WANG Tianshu, CHEN Junda, et al. Scintillation index reducing based on wide-spectral mode-

locking fiber laser carriers in a simulated atmospheric turbulent channel[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3421-3424.

- [2] WALSH B M. Review of Tm and Ho materials; spectroscopy and lasers[J]. *Laser Physics*, 2009, 19(4): 855-866.
- [3] ZHOU Gengji, XIN Ming, KAERTNER F X, et al. Timing jitter of Raman solitons[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5105-5108.
- [4] SWIDERSKI J, MICHALSKA M, GRZES P. Broadband and top-flat mid-infrared supercontinuum generation with 3.52 W time-averaged power in a ZBLAN fiber directly pumped by a 2 μm mode-locked fiber laser and amplifier[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(7): 152.
- [5] 韩冬冬, 张佳月, 高琼, 等. 可切换多波长全光纤被动锁模光纤激光器[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 13-18.
- HAN Dongdong, ZHANG Jiayue, GAO Qiong, et al. Switchable multi-wavelength passively mode-locked all-fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 13-18.
- [6] 王雄飞, 李尧, 朱辰, 等. 基于 SESAM 的全光纤被动锁模光纤激光器[J]. *激光与红外*, 2015, 45(11): 1319-1324.
- WANG Xiongfei, LI Yao, ZHU Chen, et al. All fiber passively mode-locked Yb-doped fiber laser with SESAM[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(11): 1319-1324.
- [7] 张朝阳, 陆宝乐, 陈浩伟, 等. 基于非线性光纤环形镜被动锁模掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 173-179.
- ZHANG Zhaoyang, LU Baole, CHEN Haowei, et al. Passively mode-locked erbium-doped fiber laser based on nonlinear fiber loop mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 173-179.
- [8] 付思, 陈根祥. 非线性偏振旋转光纤激光器的原理与关键技术[J]. *光通信技术*, 2013, 37(7): 36-39.
- FU Si, CHEN Genxiang. Principal and key technique of nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[J]. *Optical Communication Technology*, 2013, 37(7): 36-39.
- [9] CUI Yudong, LIU Xueming. Graphene and nanotube mode-locked fiber laser emitting dissipative and conventional solitons[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18969-18974.
- [10] CHEN Houren, LIN K H, TSAI C Y, et al. 12 GHz passive harmonic mode-locking in a 1.06 μm semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 845-847.
- [11] CHOULI S, GRELU P. Rains of solitons in a fiber

- laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11776-11781.
- [12] LECAPLAIN C, GRELU P, SOTO-CRESPO J M, et al. Dissipative rogue waves generated by chaotic pulse bunching in a mode-locked laser[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 20(23): 233901.
- [13] 王瀚霄, 李雷, 赵鹭明. 色散管理光纤激光器中束缚态孤子动力学演化特性[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 68-72.
WANG Hanxiao, LI Lei, ZHAO Luming. Dynamics evolution characteristics of bound state solitons in dispersion-managed fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 68-72.
- [14] BARTELS A, HEINECKE D, DIDDAMS S A. 10 GHz self-referenced optical frequency comb[J]. *Science*, 2009, 326(5953): 681.
- [15] GAIDA C, HEUERMANN T, GEBHARDT M, et al. High-power frequency comb at 2 μm wavelength emitted by a Tm-doped fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5178-5181.
- [16] ROHRMANN P, HAUSE A, MITSCHKE F. Solitons beyond binary: possibility of fibre-optic transmission of two bits per clock period[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2(1): 1-4.
- [17] DONOVAN G M. Dynamics and statistics of noise-like pulses in modelocked lasers[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2015, 309: 1-8.
- [18] 杨亚涛, 邹媛, 曾琼, 等. 多孤子和类噪声脉冲共存的锁模光纤激光器[J]. *物理学报*, 2022, 71(13): 197-204.
YANG Yatao, ZOU Yuan, ZENG Qiong, et al. Coexistence dynamics of multiple solitons and noise-like pulses in a mode-locked fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(13): 197-204.
- [19] MAO Dong, LIU Xueming, HAN Dongdong, et al. Compact all-fiber laser delivering conventional and dissipative solitons[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3190-3193.
- [20] WANG Yazhou, LI Jianfeng, ZHANG Entao, et al. Coexistence of noise-like pulse and high repetition rate harmonic mode-locking in a dual-wavelength mode-locked Tm-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17192-17200.
- [21] LIU Bowen, LIU Yusong, LUO Yiyang, et al. Coexistence of soliton singlets and molecules in a dual-wavelength mode-locked fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2020, 457: 124700.
- [22] ZHAO Yiwu, ZHAO Desheng, LIU Runmin, et al. Switchable generation of a sub-200 fs dissipative soliton and a noise-like pulse in a normal-dispersion Tm-doped mode-locked fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(12): 3575-3581.
- [23] 高玉欣, 徐文成, 罗智超, 等. 环形腔光纤激光器中光谱边带不对称性特性研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 132-136.
GAO Yuxin, XU Wencheng, LUO Zhichao, et al. Characteristics of the sideband asymmetry in a fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 132-136.
- [24] ZHAO L M, TANG D Y, ZHANG H, et al. Bunch of rest-less vector solitons in a fiber laser with SESAM[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8103-8108.
- [25] TANG D Y, ZHAO B, ZHAO L M, et al. Soliton interaction in a fiber ring laser[J]. *Hawaii Journal of Medicine & Public Health*, 2005, 72(1 pt 2): 016616.
- [26] PAN S, LOU C. Stable multiwavelength dispersion-tuned actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser using nonlinear polarization rotation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(13): 1451-1453.