

耗散孤子和束缚态脉冲可切换的超连续谱产生

李颖奎, 任 行, 李 鑫, 杜 垒, 王天枢, 姜会林

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 当超短脉冲进入高非线性光纤时, 在色散和非线性效应的共同作用下, 脉冲频谱中会产生一些新的频率分量, 使得输出频谱比输入频谱宽得多。这种光谱被称为超连续谱。超连续谱光源具有光谱范围宽、方向性好、亮度高、空间相干性好等优点。在锁模激光器中, 传统孤子、耗散孤子和类噪声脉冲可以作为种子源产生超连续谱。文中, 笔者建立了一个 NPR 被动锁模光纤激光器来产生脉冲激光。然后, 添加一段 DCF 以补偿腔中的色散, 从而产生耗散孤子。同时, 通过调节腔内 PC, 可以实现束缚态和耗散孤子的状态切换。输出脉冲经 10 m 单模光纤压缩后注入部分拉锥后的高非线性光纤以产生超连续谱。实验中, 我们得到了脉宽为 5.6 ps、重复频率为 32 MHz、信噪比为 52 dB 的耗散孤子锁模脉冲, 压缩后的脉冲宽度为 868 fs, 用作超连续谱产生。超连续谱的覆盖范围约为 1200~2200 nm, 其 20 dB 谱宽为 357 nm。通过调节偏振控制器, 实现耗散孤子脉冲与束缚态脉冲之间的切换, 束缚态脉冲持续时间为 1.4 ps, 脉冲间隔为 14 ps, 信噪比为 51 dB, 产生 1600~1870 nm 的超连续光谱, 20 dB 的光谱宽度为 135 nm。

关键词: 超快激光器; 被动锁模; 超连续谱; 耗散孤子; 束缚态孤子

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220035

Supercontinuum generation assisted by dissipative and bound state pulse switchable

Li Yingkui, Ren Hang, Li Xin, Du Lei, Wang Tianshu, Jiang Huilin

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: When an ultrashort pulse bursts into a highly nonlinear fiber, some new frequency components are generated in the pulse spectrum under the combined action of dispersion and nonlinear effects, which makes the output spectrum much broader than the input spectrum. The spectrum is called the supercontinuum. Supercontinuum light sources have the advantages of a wide spectral range, good directivity, high brightness, and good spatial coherence. In mode-locked lasers, traditional solitons, dissipative solitons, and noise-like pulses can be used as seed sources to generate a supercontinuum spectrum. In this paper, we build an NPR passively mode-locked fiber laser to generate pulsed laser. Then, a section of DCF is added to compensate for the dispersion in the cavity to produce dissipative solitons. Meanwhile, the states of bound states and dissipative solitons can be switched by carefully adjusting the paddles of PC in the cavity. The output pulse is compressed by a 10 m single-mode fiber before being injected into a tapered highly nonlinear fiber to generate a supercontinuum. In the experiment, we obtain a dissipative soliton mode-locked pulse with a pulse duration of 5.6 ps, a repetition

收稿日期:2022-01-12; 修订日期:2022-03-15

基金项目:国家自然科学基金(61975021); 吉林省自然科学基金(YDZJ202101 ZYTS139)

作者简介:李颖奎,男,博士生,主要从事光纤激光及其激光通信技术方面的研究。

导师简介:王天枢,男,教授,博士,主要从事光纤激光器、空间激光通信技术方面的研究。

frequency of 32 MHz, and a signal-to-noise ratio of 52 dB. The compressed pulse duration is 808 fs, which is used as the seed to generate a supercontinuum. The cover range of the supercontinuum is approximately 1 200 nm to 2 200 nm, and its 20 dB spectrum width is 357 nm. By tuning the polarization controller, the switch between the dissipative soliton pulse and the bound state pulse is realized. The pulse duration of the bound state is 1.4 ps, the pulse separation is 14 ps, and the signal-to-noise ratio is 51 dB, which produces a supercontinuum spectrum of 1 600-1 870 nm with a 20 dB spectral width of 135 nm.

Key words: ultrafast lasers; passively mode-locked; supercontinuum; dissipative soliton; bound state soliton

0 引言

被动锁模光纤激光器因其在工业和科学研究中的重要应用价值而受到广泛关注。通过调节激光谐振腔内净色散可以获得传统孤子、拉伸脉冲、自相似脉冲和耗散孤子。其中,耗散孤子存在于耗散系统中,激光系统的增益和损耗对其形成起着决定性的作用^[1]。孤子脉冲在激光腔内工作时会积累非线性相移。当泵浦功率过高时,脉冲将积累过多的非线性相移,从而导致脉冲分裂。与传统孤子和拉伸脉冲相比,耗散孤子可以承受更高的非线性相移,不易分裂,输出的脉冲能量更高^[2]。正是由于耗散孤子的这一特性,它可以作为超连续谱的激励源。单模光纤在 1.55 μm 波段呈现负色散,在色散和非线性效应的联合作用下,光谱中产生了新的频率成分,使发射光的光谱宽度更大,输出宽带光谱称为超连续谱^[3]。超连续谱光源具有光谱范围宽、方向性好、亮度高、空间相干性好等优点,用于光学频率测量、光学相干层析成像、生物医学显微镜、光通信、光纤传感、光学频率梳等领域^[4-5],具有非常重要的研究和应用价值。束缚态是被动锁模光纤激光器中一种特殊的多脉冲锁模态,通常由两个或多个脉冲组成,脉冲间隔一定距离^[6]。

2017 年, E. Hernandez-Escobar 等报道了由功率放大的类噪声脉冲泵浦非线性光纤获得了超连续谱,超连续谱的覆盖范围可达 1 261~2 261 nm^[7]。2018 年,高静报道了因泵浦 10 m 光子晶体光纤覆盖可见光波段 600~1 700 nm 的超连续谱^[8]。2019 年,王凯杰等人在实验中观测到束缚态耗散孤子脉冲,并利用该脉冲光泵浦光子晶体光纤,获得了近红外超连续谱^[9]。2020 年,邹宝英等利用数值模拟了飞秒束缚态脉冲在单模光纤中超连续谱的产生,结果表明,脉冲间隔对超连续谱的产生有影响,通过调整脉冲间距可以使超

连续谱展宽^[10]。2021 年,纪海莹等利用传统孤子的束缚态脉冲作为激励源,实现了位于第三窗口的超连续谱产生^[11]。通过以上的报道可知,在锁模激光器中可以用传统孤子、耗散孤子、类噪声脉冲作为激励源实现超连续谱的产生,然而针对于一种可切换的单脉冲与束缚态脉冲的超连续谱的产生报道较少。

文中利用单模光纤压缩耗散孤子脉冲,实现了耗散孤子飞秒量级脉冲输出,并且通过调节 PC 和泵浦功率实现了耗散孤子的束缚态切换,分别进入拉锥后的高非线性光纤实现了可切换的超连续谱的产生。文中研究利用束缚态脉冲产生超连续谱,对超快光纤激光领域的研究具有参考意义。

1 实验结构

研究采用的实验结构如图 1 所示,一个 980 nm 泵浦源通过 980/1 550 nm 波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM) 泵浦 0.9 m 长高掺铒光纤,二阶色散为 $-0.02001 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。腔中的两个偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 和一个偏振相关隔离器 (Polarization Dependent Isolator, PD-ISO) 作为一种类饱和吸收体结构实现激光器在腔中的锁模。色散补偿光纤长度为 1 m,二阶色散为 $1.848 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。其他器件的尾纤均为标准单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF),长度为 5 m,二阶色散为 $-0.02294 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。谐振腔内 10% 的光通过光纤耦合器 1 (Optical Coupler, OC) 从腔中输出,其余 90% 的光反馈回环形腔中。输出的激光通过耦合器 2 的 20% 端口输出,并通过频谱分析仪 (FSA, Agilent N1996 A) 显示和记录频谱信息。光纤耦合器 2 的 80% 端口输出激光的脉冲宽度通过单模光纤压缩,然后通过掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 进行放大。

放大的脉冲光注入进一段经过拉锥的 10 m 长高

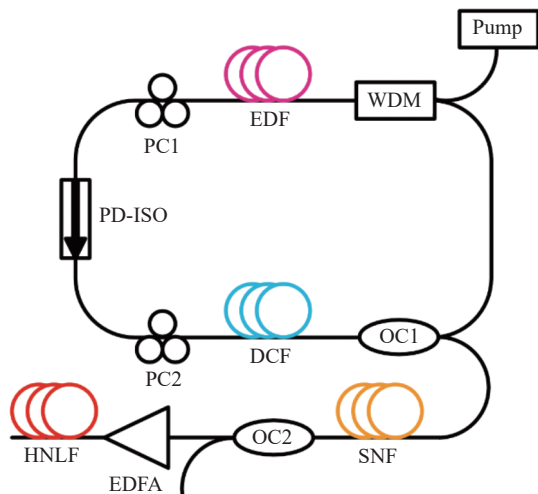


图 1 锁模光纤激光器结构。WDM: 波分复用器; EDF: 掺铒光纤; PC: 偏振控制器; PD-ISO: 偏振无关隔离器; DCF: 色散补偿光纤; OC: 光耦合器; SMF: 单模光纤; EDFA: 掺铒光纤放大器; HNLF: 高非线性光纤

Fig.1 Structure of mode-locked fiber laser. WDM: wavelength division multiplexer; EDF: erbium-doped fiber; PC: polarization controller; PD-ISO: polarization-dependent isolator; DCF: dispersion compensation fiber; OC: optical coupler; SMF: single-mode fiber; EDFA: Erbium-doped fiber amplifier; HNLF: high nonlinear fiber

非线性光纤 (High Nonlinear Fiber, HNLF), 如图 2 所示。实验中使用的 HNLF 的数值孔径为 0.35, 传输损耗小于 1.5 dB/km。经光谱分析仪 (OSA, YOKOGAWA AQ6375) 对输出的各种光谱进行观察和数据记录, 光谱仪最高分辨率为 0.05 nm。锁模激光的脉冲序列由 10 GHz 高速光电探测器探测, 并通过高速示波器观测相应的波形 (Oscilloscope, Agilent D S 09254 A), 脉



图 2 拉锥后的高非线性光纤显微图

Fig.2 Micrograph of highly nonlinear optical fiber after taper pulling

冲的自相关曲线由自相关仪 (Auto-correlator, FR-103 XL) 测量。

拉锥后的高非线性光纤直径为 10 μm, 相比于普通高非线性光纤, 根据公式 (1) 和 (2), 它的非线性效应更强。

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint \iint_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint \iint_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^4 dx dy} \quad (1)$$

式中: A_{eff} 为光纤的有效模场面积; $F(x,y)$ 代表光纤中基模的模分布。

$$\gamma(\omega_0) = \frac{\omega_0 n_2}{c A_{\text{eff}}}, n_2 = \frac{2n_2}{\omega_0 c} \quad (2)$$

式中: γ 为非线性参量; ϵ_0 为介电常数; ω_0 为中心频率; n_2 为非线性克尔参量; c 为光速; \bar{n}_2 为非线性折射率系数。

2 结果与讨论

2.1 基于耗散孤子的超连续谱产生

耗散孤子的形成是色散和非线性、增益和损耗等双重平衡的结果^[5]。耗散孤子可以容忍更高的非线性效应, 积累更多的非线性相移, 并大大提高脉冲分裂的阈值, 实现光谱范围宽、极限脉宽小、脉冲能量高的脉冲输出。

由于色散补偿光纤和单模光纤的熔接带来的损耗, 该激光器的锁模阈值相对与工作于负色散区的激光器锁模阈值更高。于是, 当把 980 nm 泵浦的功率增加至 260 mW 时, 才会产生锁模激光并通过光纤耦合器 1 输出。相关的输出激光测量数据展现在图 3 中, 如图 3(a) 所示, 可以看出: 其光谱近似为矩形, 边缘陡峭, 底部平坦, 是一个很明显的耗散孤子的光谱, 其中心波长为 1560 nm, 3 dB 带宽为 24.56 nm。如图 3(b) 所示为自相关仪测量的脉冲宽度, 通过高斯拟合得到的脉冲宽度为 5.6 ps。根据计算, 它的时间带宽积 (Time Bandwidth Product, TBP) 是 16.95, 说明脉冲的啁啾大。图 3(c) 和 3(d) 是脉冲的射频频谱, 它的信噪比为 52 dB, 重复频率为 28 MHz, 可以证明该激光器工作稳定。

在光纤耦合器 1 后面增加一段单模光纤以压缩脉宽。如图 4(a) 所示, 该图表示脉冲宽度随着单模光纤长度变化的脉宽演化情况。当通过增加单模光纤

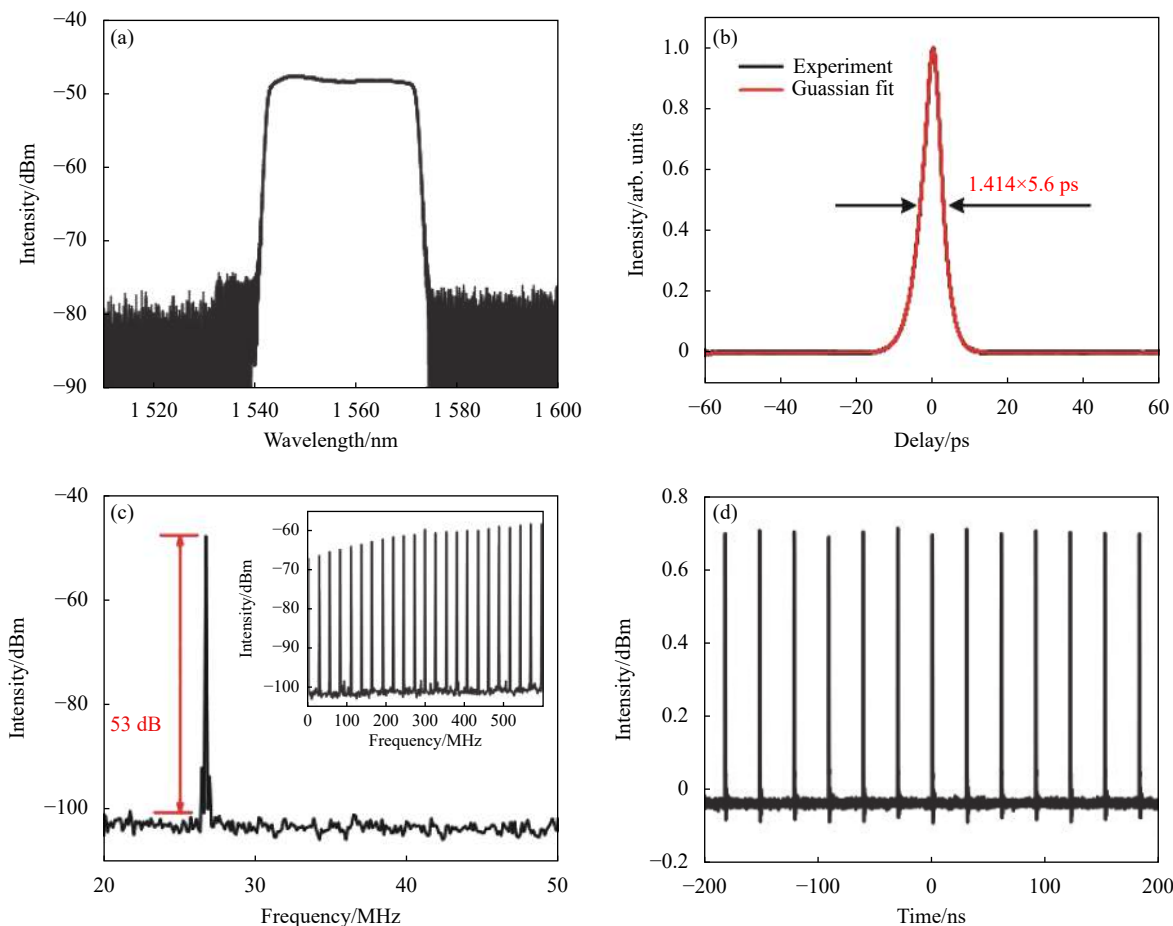


图 3 耗散孤子工作图。(a) 光谱图；(b) 自相关；(c) 射频谱；(d) 时域图

Fig.3 Diagram of dissipative soliton operation. (a) Optical spectrum; (b) Autocorrelation trace; (c) Radio-frequency spectrum; (d) Diagram of time-domain

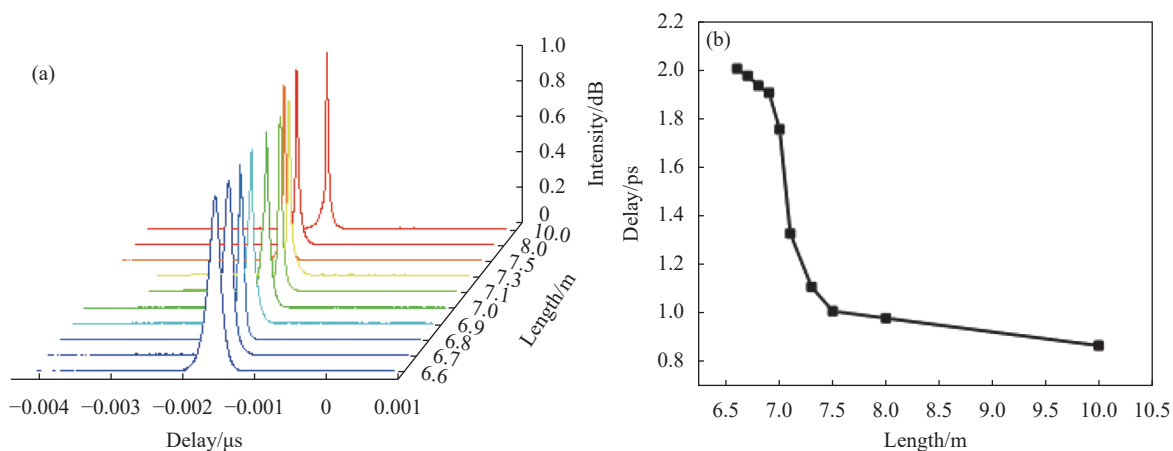


图 4 脉冲宽度随单模光纤长度的演化图。(a) 脉宽演化图；(b) 脉宽与 SMF 长度关系图

Fig.4 Evolution diagram of the pulse duration as a function of the length of SMF. (a) Evolution of pulse duration; (b) Pulse duration as a function of the length of SMF

长度来增加腔外负色散到一定值时,可以将脉宽压缩到极限。图 4(b) 表示脉冲宽度随单模光纤长度的变化,

随着单模光纤长度的增加,脉冲宽度逐渐变窄,当长度为 10 m 时,净色散为 0,可以将脉冲宽度压缩至 868 fs。

将脉冲宽度保持在 868 fs, 并注入掺铒光纤放大器, 放大脉冲能量后进入高非线性光纤以产生超连续光谱。如图 5(a) 所示, 光谱的宽度为 1200~2200 nm, 随着掺铒光纤放大器功率的增加, 光谱的宽度逐渐变宽。20 dB 带宽最高为 357 nm, 但是在 1560 nm 左右

仍然有未被全部吸收的信号光。如图 5(b) 所示, 黑线代表着随着掺铒光纤放大器的功率的增大, 激发更多的新频率成分, 20 dB 带宽逐渐变大。红线代表着随着掺铒光纤放大器的功率的增大, 激光器输出功率逐渐增大, 最大输出功率为 22 mW。

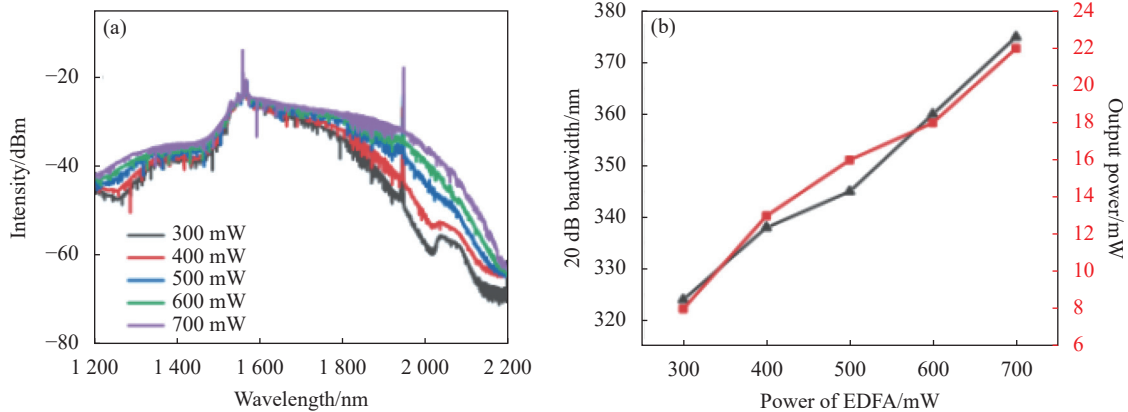


图 5 基于耗散孤子的超连续谱光谱图。(a) 超连续谱光谱演化图; (b) EDFA 功率和输入功率和 20 dB 带宽关系图

Fig.5 Spectrum diagram of supercontinuum generated by dissipative soliton. (a) Evolution diagram of supercontinuum spectrum; (b) Power of EDFA as a function of input power and bandwidth of 20 dB

2.2 基于束缚态脉冲的超连续谱产生

将泵功率增加到 400 mW, 并通过精细调节偏振控制器可以得到相应的耗散孤子束缚态脉冲。如

图 6(a) 所示, 可以发现: 耗散孤子的光谱出现了周期性调制的特性, 其中心波长和 3 dB 带宽分别为 1559.64 nm 和 27.15 nm, 调制周期为 0.36 nm。图 6(b) 为测量得

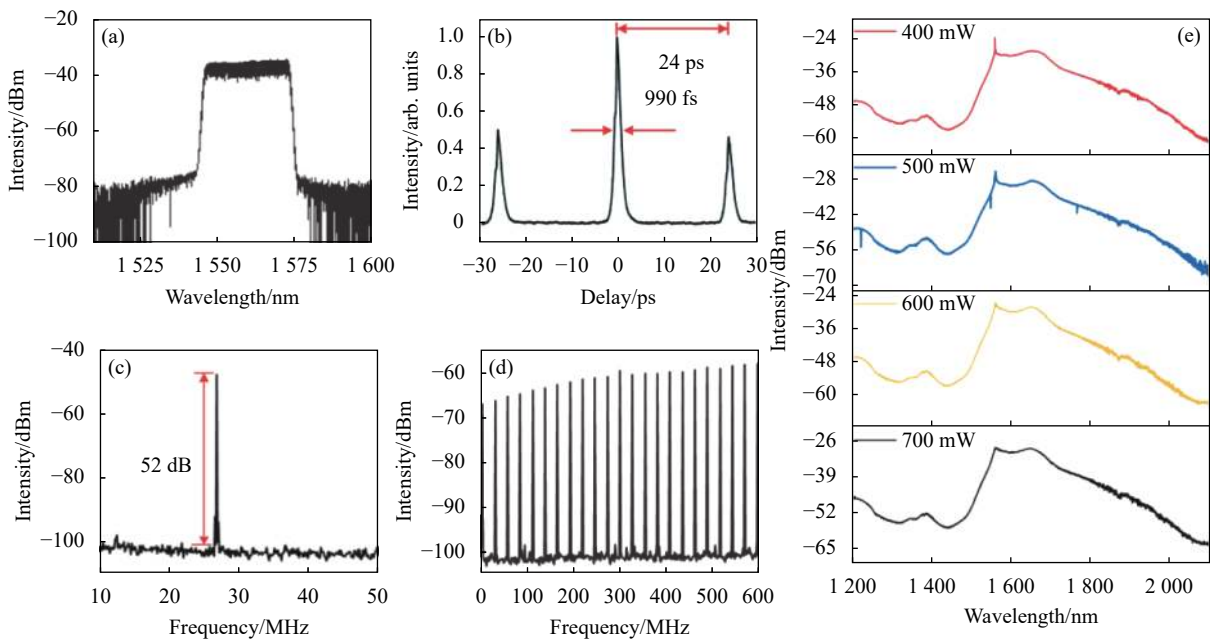


图 6 束缚态孤子的超连续谱产生耗散孤子工作图。(a) 光谱图; (b) 自相关; (c) 和 (d) 射频谱; (e) 位于第三窗口的超连续谱

Fig.6 Working diagram of dissipative generated by the supercontinuum of bound state soliton. (a) Optical spectrum; (b) Autocorrelation trace; (c), (d) Radio-frequency spectrum; (e) Supercontinuum spectrum located in the third window

到的束缚态孤子自相关曲线,可以看到:相邻脉冲之间的时间间隔为 24 ps,脉冲宽度为 1.4 ps,相邻脉冲之间的时间间隔大于脉冲持续时间的 5 倍,可以判断为松散束缚态,脉冲强度比固定并接近于 1:2:1,这是更常见的束缚态脉冲的特征。图 6(c)、(d) 是它的射频频谱,其信噪比为 51 dB,说明该激光器工作稳定。

束缚态脉冲由掺铒光纤放大器放大,后注入拉锥的 5 m 长高非线性光纤。在高非线性光纤中,受激拉曼散射、自相位调制、交叉相位调制和四波混频等非线性效应使光谱展宽^[11]。400 mW 泵浦功率下的频谱如图 5(e) 所示,在 1560 nm 左右仍然有泵浦光。逐渐增加泵浦功率至 700 mW,发现泵浦光被完全吸收。1600~1700 nm 的超连续谱的平坦度小于 1.62 dB。20 dB 的光谱宽度为 135 nm,完全覆盖 1600~1800 nm。因为在这个窗口范围内有大量的分子吸收峰,它们正好位于水分子吸收峰之间的谷值,小的水吸收系数和大量的分子吸收线使该波长范围内的宽光谱光源包含深层生物成像、光谱分析和材料处理等领域的潜在应用价值。该区域的耗散孤子是一个稳定的局部解,由于耗散孤子的频谱宽且顶部光滑,与具有 Kelly 边带的传统孤子相比,耗散孤子具有更好的稳定性。

3 结 论

文中研究了一种基于非线性偏振旋转锁模的超快光纤激光器,通过调节腔内偏振控制器来控制腔内激光的偏振态,可以分别输出稳定的耗散孤子锁模脉冲和束缚态锁模脉冲。采用单模光纤将脉冲压缩到飞秒级,经过放大后进入 10 m 拉锥高非线性光纤,获得了谱宽 1200~2200 nm 的超连续谱。然后由放大的束缚态脉冲经过拉锥的 5 m 高非线性光纤可以获得从 1600~1700 nm 的平坦光谱。该激光器整体结构简单,输出脉冲稳定。从实验中获得的超连续谱对光谱分析、材料加工、生物医学成像等应用具有极高的价值。

参考文献:

[1] Zhang Z X, Xu Z W, Zhang L. Tunable and switchable dual-

wavelength dissipative soliton generation in an all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser with birefringence fiber filter [J]. *Opt Express*, 2012, 20: 26736-26742.

[2] Pan Wei, Jin Liang, Wang Jia Zhu, et al. All-normal-dispersion dissipative soliton fiber laser using an offset-splicing graded-index-multimode-fiber-based saturable absorber [J]. *Appl Opt*, 2021, 60: 923-928.

[3] Aghayari E, Ghaleh K J. High-power supercontinuum generation by noise-like pulse amplification in Yb-doped fiber amplifier operating in a nonlinear regime [J]. *Appl Opt*, 2019, 58: 4020-4024.

[4] Yu Feng, Sun Chang, Gao Jing, et al. All-fiber ultra-short supercontinuum generation and characters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3555-3558. (in Chinese)

[5] Hu Kongyun, Xiao Guangzong, Zhang Ying, et al. Double-beam fiber optical trap experiments based on supercontinuum laser [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 370-375. (in Chinese)

[6] 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): 0803008. (in Chinese)

[7] Hernández-Escobar I E, Bello-Jiménez M, Pottiez O, et al. Flat supercontinuum generation pumped by amplified noise-like pulses from a figure-eight erbium-doped fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(10): 105104.

[8] Gao Jing. Tunable mode-locked fiber laser pumped supercontinuum source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 25-30. (in Chinese)

[9] Wang Kaijie, Wang Hang, Du Tuanjie, et al. Effect of intracavity filtering bandwidth on bound-state soliton generation in normal dispersion regime [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0806004. (in Chinese)

[10] Zou Baoying, Dai Jianan, Hong Weiyi. Study on supercontinuum generation of femtosecond double pulses bound-state in optical fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0706003. (in Chinese)

[11] Ji Haiying, Wang Tianshu, Xiong Hao, et al. Flat fiber supercontinuum spectrum generation in the third near-infrared window [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 565-570. (in Chinese)