

1.7 μm 全光纤锁模脉冲掺铥光纤激光器研究

高玉欣^{1,2}, 陈吉祥², 张泽贤², 战泽宇², 罗智超^{2*}

(1. 山东理工职业学院 机电工程学院, 山东 济宁 272067;
2. 华南师范大学 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510631)

摘要: 1.7 μm 超短脉冲光纤激光器在生物成像和材料加工等领域具有重要的应用前景, 受到了科学家们的极大关注。基于非线性偏振旋转锁模技术, 实验搭建了全光纤结构的 1.7 μm 锁模脉冲掺铥光纤激光器。通过在激光器内加入光纤滤波器抑制掺铥光纤中的长波激光发射, 同时采用纤芯泵浦的方式有效获得了 1.7 μm 波段的增益。激光器输出脉冲的光谱中心波长为 1733 nm, 3 dB 带宽为 6.3 nm。锁模脉冲的重复频率为 19.56 MHz, 平均功率为 1.4 mW。同时, 数值模拟了脉冲在激光器的腔内演化。文中提出的 1.7 μm 全光纤锁模激光器有利于进一步提高 1.7 μm 激光源的稳定性和集成度, 在生物成像等领域具有重要的应用价值。

关键词: 超快光纤激光器; 1.7 μm 激光光源; 掺铥光纤; 被动锁模; 超短脉冲
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220234

Research on a 1.7 μm all-fiber mode-locked Tm-doped fiber laser

Gao Yuxin^{1,2}, Chen Jixiang², Zhang Zexian², Zhan Zeyu², Luo Zhichao^{2*}

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Polytechnic College, Jining 272067, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices,
South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: The 1.7 μm ultrashort pulse fiber laser has received great attention for its promising applications in various fields, such as bioimaging and materials processing. We experimentally built a 1.7 μm all-fiber structure mode-locked Tm-doped fiber laser based on the nonlinear polarization rotation technique. The optical gain at the 1.7 μm waveband is effectively obtained by using a core-pumping scheme, and the ASE at long wavelengths is suppressed by a fiber-based bandpass filter in the cavity. The proposed fiber laser delivers an ultrashort pulse with a central wavelength of 1733 nm and a 3 dB bandwidth of 6.3 nm. The mode-locked pulse has a repetition frequency of 19.56 MHz and an average power of 1.4 mW. In addition, the evolution of the pulse inside the laser cavity is numerically simulated. The proposed 1.7 μm all-fiber mode-locked laser is beneficial to further improve the stability and integration of the 1.7 μm laser source, which could find important applications in fields such as bioimaging.

Key words: ultrafast fiber laser; 1.7 μm laser source; Tm-doped fiber; passive mode-locking; ultrashort pulse

收稿日期: 2022-04-02; 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金 (11874018, 11974006, 61805084, 61875058); 广东省自然科学基金 (2019 A1515010879, 2021 A1515012315)

作者简介: 高玉欣, 女, 讲师, 硕士, 主要从事光纤激光器、光通信、光机电一体化等方面的研究。

通讯作者: 罗智超, 男, 研究员, 博士, 主要从事光纤激光技术及应用、有源/无源光通信器件、非线性光纤光学等方面的研究。

0 引言

超快光纤激光器具有光束质量好、易集成以及稳定性好等多种优点,已经被广泛应用于科学研究和工业应用领域中^[1-3]。光纤激光器技术的发展极大地推动了相关科学领域的研究。一般来说,不同应用领域对于光纤激光器的性能指标有不同要求。其中,工作波段作为激光器的重要输出指标之一^[4],决定了激光器的实际应用范围。近年来,1.7 μm 波段的超短脉冲激光由于其独特的光谱特性受到了研究人员的广泛关注。相比于传统的成像窗口,1.7 μm 波段超快激光光源在生物组织内具有更小的散射和较低的水吸收^[5-6]。因此,1.7 μm 波段的超快光源可以在生物成像中实现更大的成像深度,例如多光子显微成像、相干断层成像等^[7-8]。另一方面,脂肪以及 C-H、O-H 等共价键的高吸收峰窗口也位于 1.7 μm 波段,因此 1.7 μm 波段的激光光源还可以应用于脂肪组织的光声成像、皮脂腺激光手术和聚合物加工与检测中^[9-10]。

对 1.7 μm 波段超快激光光源的巨大需求促使科学家们提出了各种解决方案来获得 1.7 μm 波段的超快光源^[11]。由于 1.7 μm 处于稀土离子光纤的非典型发射波段,因此,研究人员首先提出利用孤子自频移 (Soliton self-frequency shift, SSFS) 方法获得的 1.7 μm 波段超短脉冲光源^[12]。虽然 SSFS 方法不受增益带宽的限制,可以灵活地获得不同波长的脉冲,然而,利用 SSFS 获得的脉冲在光纤中的频移量与泵浦脉冲峰值功率有关。如需进一步提升 1.7 μm 波段脉冲功率通常需要使用大纤芯的棒状光子晶体光纤,这无疑会增加系统的复杂度,限制了其应用范围。除了利用非线性波长转换的方法^[13],寻找合适的增益光纤来提供 1.7 μm 波段增益是更为直接有效的方式。俄罗斯科学院的研究人员报道的掺铋光纤 (Bismuth-doped fiber, BDF) 可以直接获得 1.7 μm 波段增益^[14-15]。然而,目前 BDF 在 1.7 μm 波段的增益系数较低,而且并未实现商业化应用。

相比于掺铋光纤,商业化的掺铟光纤在 ${}^3\text{F}_4$ - ${}^3\text{H}_6$ 能级之间具有 1600~2100 nm 的宽发射谱^[16-17],被证明是实现 1.7 μm 激光的有效增益介质^[18-19]。通过在激光腔中加入带通滤波装置,锁模掺铟光纤激光器可以有效输出 1.7 μm 波段的超短脉冲。基于商用掺铟光

纤,研究人员报道了不同性能参数的 1.7 μm 锁模掺铟光纤激光器。然而这些激光器几乎都包含空间光滤波器件,例如声光滤波器^[20]、二向色镜^[21]、带通滤光片^[22]等。这些空间光的装置无疑会降低激光器的稳定性和集成度。从实际应用角度考虑,全光纤结构的 1.7 μm 锁模激光器将会是更好的选择。最近,南洋理工大学的 Chen 等人研制出具有正常色散的掺铟光纤,并通过弯曲 TDF 产生的滤波效应从而直接搭建 1.7 μm 的全光纤锁模激光器^[23]。然而,该正常色散掺铟光纤需要复杂的预处理,同时没有实现商用。此外,通过弯曲光纤产生的滤波效应也在一定程度上降低了超快光纤激光器的可靠性。

文中报道了一种基于光纤带通滤波器的 1.7 μm 全光纤掺铟锁模激光器。实验中,通过在激光器内加入光纤带通滤波器有效地过滤了长波放大自发辐射 (Amplified spontaneous emission, ASE) 光。利用非线性偏振旋转 (Nonlinear polarization rotation, NPR) 技术实现激光器的锁模,最终获得了中心波长为 1733 nm, 3 dB 带宽为 6.3 nm 的锁模脉冲输出。除此之外,笔者还数值模拟研究了脉冲在激光器内的演化过程。笔者相信,文中研制的 1.7 μm 全光纤掺铟锁模激光器,不仅可以进一步提升 1.7 μm 超快激光源的集成度和稳定性,而且能够为 1.7 μm 超快光纤激光器的设计提供参考,有望在生物成像、聚合物加工等领域获得重要应用。

1 实验装置和原理

图 1 是实验搭建的 1.7 μm 全光纤掺铟锁模激光器装置示意图。激光器增益介质是一段 1 m 长的单模掺铟光纤 (TmDF200, OFS)。通过优化掺铟光纤的长度来减少信号重的重吸收效应。实验采用中心波长为 1560 nm 的单模掺铒光纤激光器 (Erbium-doped fiber laser, EDFL) 作为泵浦源,并通过 1560 nm/1750 nm 的波分复用器 (Wavelength division multiplexer, WDM) 对掺铟光纤进行纤芯泵浦。由于掺铟光纤在 1.7 μm 波段表现为准三能级系统特性,使用纤芯泵浦的方式有利于在掺铟光纤中实现高粒子数反转,从而有效获得短波长增益。除此之外,笔者在激光器内加入了自主设计和定制的光纤滤波器 (中心波长: 1734 nm, 3 dB

带宽: 25 nm) 来抑制长波长的放大自发辐射光, 使激光器在 1.7 μm 波段激射。该三端口滤波器的反射端口会将激光器内残余泵浦光和 ASE 输出, 来防止器件过热造成的损坏。激光腔内偏振相关隔离器 (Polarization-dependent isolator, PD-ISO) 在确保激光单向运转的同时, 还能够作为起偏器。偏振控制器 (Polarization controller, PC) 主要用于调整腔内激光的偏振状态。最后, 脉冲通过光纤耦合器 (Optical coupler, OC) 的 80% 端口输出。激光器内光纤器件尾纤均为 SMF-28 e, 腔长为 10.5 m, 其中单模光纤长度为 9.5 m, 通过计算可知激光器腔内的净色散约为 -0.4525 ps²。激光器输出光谱和脉冲由光谱仪 (Yokogawa, AQ6375 B) 和带有光电探测器 (New Focus P818-BB-35 F, 12.5 GHz) 的高速实时示波器 (Tektronix, DSA71604 B, 16 GHz) 测量。

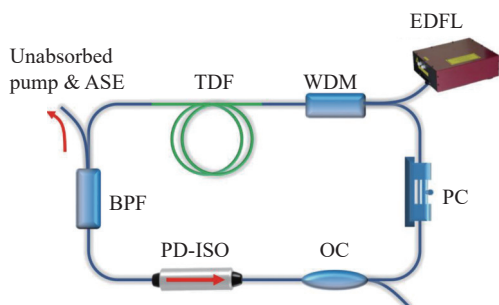


图 1 1.7 μm 全光纤锁模掺铥光纤激光器装置图

Fig.1 Schematic of the 1.7 μm all fiber mode-locked Tm-doped fiber laser

2 实验结果和数值模拟

基于 NPR 的可饱和吸收效应与激光器内的偏振状态和泵浦功率水平有关^[24]。因此, 在 340 mW 的泵浦功率条件下, 通过调节激光腔内 PC 的旋转角度, 激光器实现了单脉冲状态运行。如图 2(a)所示, 锁模脉冲光谱在中心波长两侧具有典型的 Kelly 边带^[25], 为孤子锁模的典型特征。锁模光谱的中心波长为 1733 nm, 3 dB 带宽为 6.3 nm, 对应于 501 fs 的变换极限脉冲 (双曲正割型)。由于 NPR 锁模光纤激光器中的 Lyot 滤波效应, 通过调节 PC 激光器输出的中心波长可以在小范围内调谐。图 2(c) 是测量的脉冲序列, 脉冲重复频率为 19.56 MHz 对应于 51.1 ns 的脉冲间隔。激光器的输出功率为 1.4 mW, 通过计算可知获得的单

脉冲能量约为 72 pJ。这里脉冲输出的能量受到孤子面积定理的限制, 进一步升高泵浦功率会导致脉冲分裂, 并形成多脉冲。图 2(b) 是脉冲的射频频谱图, 频率峰值位于 19.56 MHz, 这与激光器的基本重复频率一致。此外, 射频频谱信号表明激光脉冲输出的信噪比约为 55 dB, 证明了激光器工作在稳定单脉冲状态。实验中, 由于输出脉冲功率较低, 因此无法测量出可以表征脉冲宽度的自相关信号。此外, 由于掺铥光纤在长波具有很高的发射截面^[16], 这导致激光器会在长波产生宽的 ASE 光。如图 3 所示, 光纤带通滤波器的反射端口输出光谱包括长波 ASE 光谱, 以及未被吸收的 1560 nm 泵浦光。因此, 该结果证明了该光纤带通滤波器有效地过滤了这些光谱成分, 从而保证了激光器在 1.7 μm 波段的稳定运行。

为了进一步研究脉冲在激光器内的传输特性, 笔者数值模拟了脉冲在激光器内的演化过程。基于标准的对称分步傅里叶算法, 采用非线性薛定谔方程对脉冲演化进行模拟:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{g}{2} A + i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中: A 为脉冲的慢变包络振幅; i 为虚数单位; 变量 z 和 t 分别代表了传输距离和时间; β_2 、 g 和 γ 分别代表了群速度色散 (GVD)、掺铥光纤增益系数和光纤克尔非线性系数。掺铥光纤的增益系数为:

$$g = \frac{g_0}{\left(1 + \frac{E_p}{E_s}\right)} \quad (2)$$

式中: g_0 为小信号增益; $E_p = \int |A|^2 dt$ 是脉冲能量; E_s 为掺铥光纤的饱和能量, 并且可以代表泵浦功率强度。另外, 在模拟中掺铥光纤的增益带宽被设置为 200 nm。NPR 锁模过程可以用强度传递函数来表示:

$$T = 1 - \frac{q_0}{1 + \frac{|A(t)|^2}{P_0}} \quad (3)$$

式中: q_0 代表了调制深度; $|A(t)|^2$ 和 P_0 分别为瞬时强度和饱和功率。此外, 考虑到激光器的实际参数和光纤位置排布, 数值模拟使用了以下参数: $g_0=3 \text{ dBm}^{-1}$, $\gamma=0.003 \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$, 增益光纤长度和色散分别为 $L_{\text{TDF}}=1 \text{ m}$, $\beta_2=-0.025 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$, 单模光纤长度和色散为 $L_{\text{SMF}}=9.5 \text{ m}$, $\beta_2=-0.045 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$ 。调制深度和饱和功率分别

为 $q_0=0.5$ 和 $P_0=100$ W, 耦合输出比例为 $R_{out}=80\%$ 。数值模拟中超高斯型带通滤波器的中心波长和 3 dB 带

宽分别设置为 1734 nm 和 25 nm。光脉冲在激光器腔中经过多次循环后, 最终得到了稳定的输出。

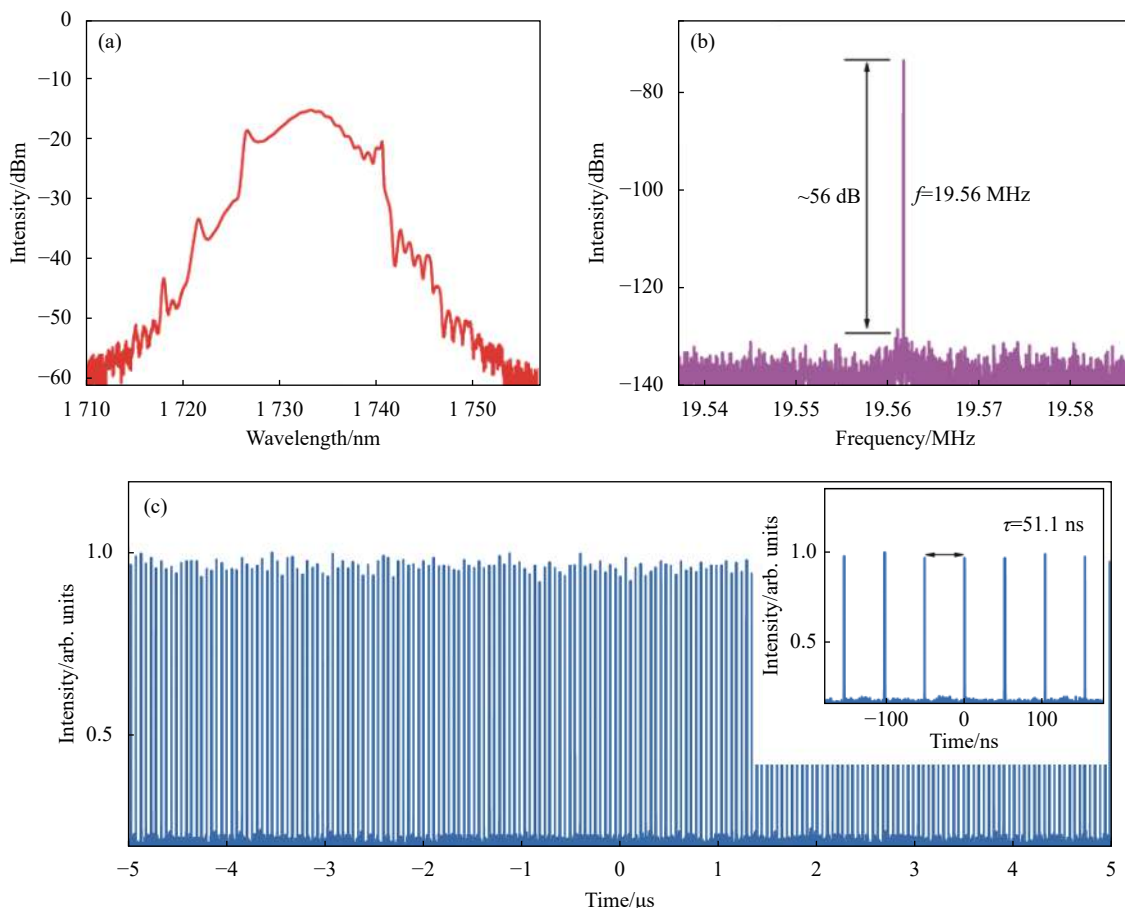


图 2 激光器输出特性。(a) 锁模光谱; (b) 射频谱; (c) 脉冲序列

Fig.2 Laser output character. (a) Mode-locked spectrum; (b) Radio frequency spectrum; (c) Pulse train

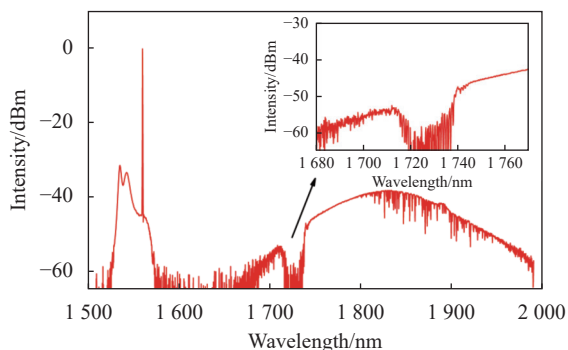


图 3 光纤带通滤波器反射端口输出的泵浦光和 ASE 光谱

Fig.3 Pump light and ASE spectra from the reflection port of the fiber-based band pass filter

图 4(a) 为数值模拟的激光器孤子脉冲输出光谱, 其展示出反常色散锁模孤子光纤激光器的典型光谱

特征, 即光谱中带有明显的 Kelly 边带。锁模孤子光谱的中心波长为 1733.4 nm, 3 dB 带宽为 6.35 nm, 对应的输出脉冲宽度为 497 fs, 如图 4(b) 所示。通过与图 2 的实验结果相比较, 可以看出数值模拟时域、频域结果与实验相吻合。注意到实验测量孤子脉冲光谱的 Kelly 边带具有不对称性, 因此笔者模拟了脉冲在腔内不同位置的光谱演化来进一步分析边带不对称性, 如图 4(c) 所示。可以看出: 由于滤波器对孤子脉冲的整形作用, 锁模光谱在经过滤波器时长波部分的边带被滤掉, 进而导致了锁模光谱上不对称的 Kelly 边带^[26]。图 4(d) 展示了锁模光谱的 3 dB 带宽在腔内演化过程, 可以看到锁模孤子光谱带宽具有呼吸行为, 这是由于激光腔内不同色散光纤及单元器件对孤子脉宽影响不同而导致的。

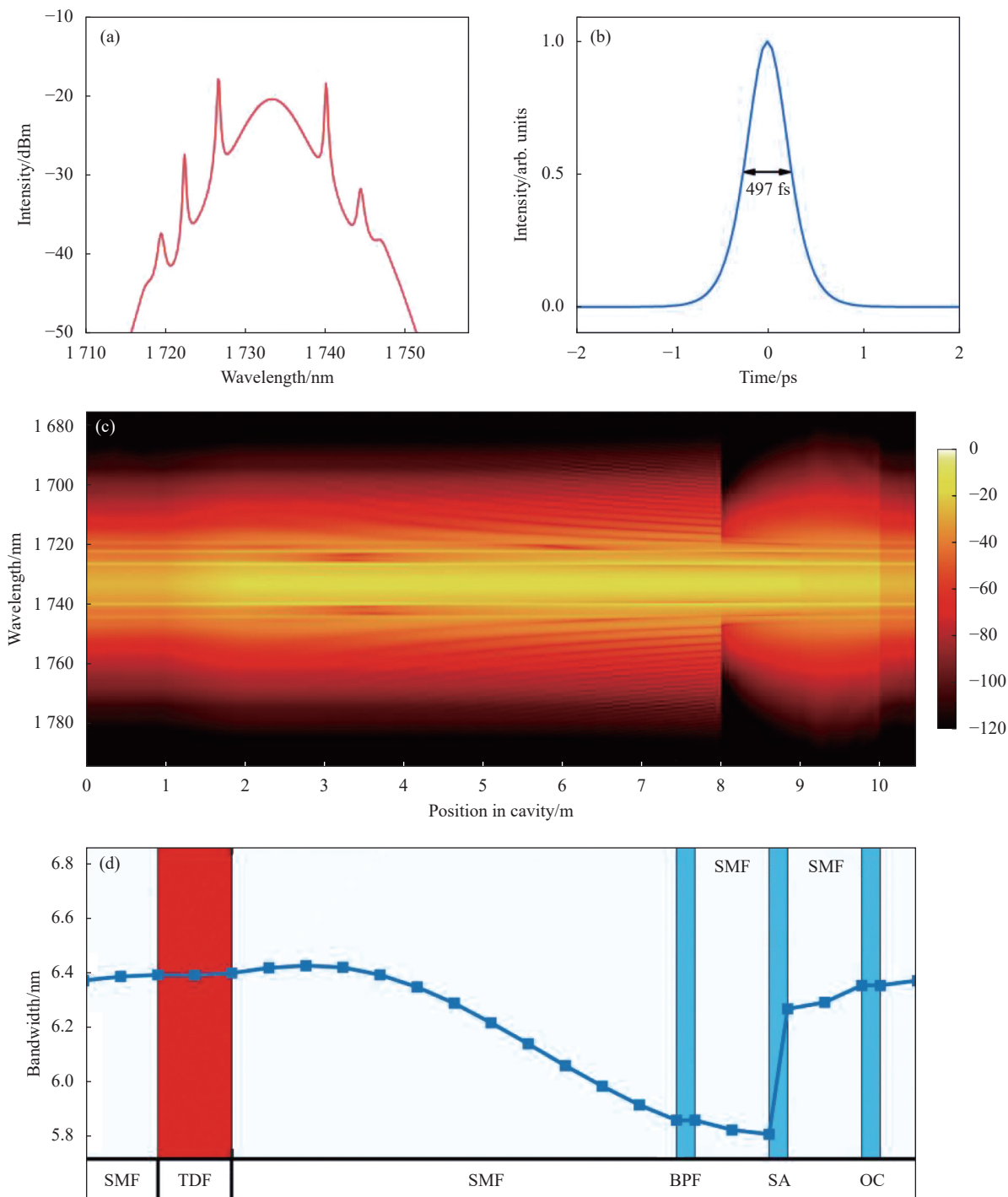


图 4 数值模拟。(a) 锁模光谱; (b) 锁模脉冲; (c) 锁模光谱在激光腔内的演化; (d) 3 dB 光谱带宽在腔内的演化

Fig.4 Numerical simulation. (a) Mode-locked spectrum; (b) Mode-locked pulse; (c) Evolution of the mode-locked spectrum in the laser cavity; (d) Evolution of the 3 dB spectral bandwidth in the cavity

3 结 论

文中报道了全光纤结构的 1.7 μm 锁模脉冲掺铽光纤激光器。通过在激光器内加入光纤带通滤波器,同时利用 NPR 锁模技术,最终获得了 1.7 μm 波段的

超短脉冲输出。激光器输出的锁模脉冲光谱中心波长和 3 dB 带宽分别为 1733 nm 和 6.3 nm。此外,基于锁模光纤激光器的实际结构参数,数值模拟了光纤激光器中光脉冲演化,并且得到了与实验数据一致的模拟结果。文中研制的全光纤 1.7 μm 激光器不仅

可以提高 1.7 μm 脉冲激光的紧凑性与可靠性, 而且能够为 1.7 μm 波段高能量脉冲放大系统提供良好的激光种子源。

参考文献:

- [1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [2] Öktem B, Pavlov I, Ilday S, et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 897-901.
- [3] Zipfel W R, Williams R M, Webb W W. Nonlinear magic: Multiphoton microscopy in the biosciences [J]. *Nature Biotechnology*, 2003, 21(11): 1369-1377.
- [4] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [5] Xu C, Wise F W. Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 875-882.
- [6] Sordillo L A, Pu Y, Pratavieira S, et al. Deep optical imaging of tissue using the second and third near-infrared spectral windows [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(5): 056004.
- [7] Horton N G, Wang K, Kobat D, et al. In vivo three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 205-209.
- [8] Zhu J, Freitas H R, Maezawa I, et al. 1700 nm optical coherence microscopy enables minimally invasive, label-free, in vivo optical biopsy deep in the mouse brain [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-13.
- [9] Alexander V V, Ke K, Xu Z, et al. Photothermolysis of sebaceous glands in human skin ex vivo with a 1708 nm Raman fiber laser and contact cooling [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2011, 43(6): 470-480.
- [10] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [11] Zhan Zeyu, Chen Jixiang, Liu Meng, et al. Recent progress of 1.7 μm ultrafast fiber lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210850. (in Chinese)
- [12] Wang K, Xu C. Tunable high-energy soliton pulse generation from a large-mode-area fiber and its application to third harmonic generation microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(7): 071112.
- [13] Liu Yang, Cao Qian, Diao Xincui, et al. Longwave mid-IR femtosecond pulse sources driven by ultrafast fiber lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210368. (in Chinese)
- [14] Firstov S V, Alyshev S V, Riumkin K E, et al. Watt-level, continuous-wave bismuth-doped all-fiber laser operating at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4360-4363.
- [15] Khagai A, Melkumov M, Riumkin K, et al. NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1127-1130.
- [16] Agger S D, Povlsen J H. Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 50-57.
- [17] Jackson S D. The spectroscopic and energy transfer characteristics of the rare earth ions used for silicate glass fibre lasers operating in the shortwave infrared [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 3(5): 466-482.
- [18] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er, Yb co-doped fibre laser at 1.6 μm [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 6084-6090.
- [19] Daniel J M O, Simakov N, Tokurakawa M, et al. Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the 1660–1750 nm wavelength band [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18269-18276.
- [20] Noronen T, Okhotnikov O, Gumenyuk R. Electronically tunable thulium-holmium mode-locked fiber laser for the 1700-1800 nm wavelength band [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14703-14708.
- [21] Li C, Wei X, Kong C, et al. Fiber chirped pulse amplification of a short wavelength mode-locked thulium-doped fiber laser [J]. *APL Photonics*, 2017, 2(12): 121302.
- [22] Chen J X, Li X Y, Li T J, et al. 1.7- μm dissipative soliton Tm-doped fiber laser [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 873-878.
- [23] Chen S, Chen Y, Liu K, et al. All-fiber short-wavelength tunable mode-locked fiber laser using normal dispersion thulium-doped fiber [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17570-17580.
- [24] Nelson L E, Jones D J, Tamura K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers [J]. *Applied Physics B*, 1997, 65(2): 277-294.
- [25] Kelly S M J. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(8): 806-807.
- [26] Li J, Wang Y, Luo H, et al. Kelly sideband suppression and wavelength tuning of a conventional soliton in a Tm-doped hybrid mode-locked fiber laser with an all-fiber Lyot filter [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 103-109.