

光学学报

可切换多波长全光纤被动锁模光纤激光器

韩冬冬*, 张佳月, 高琼, 任凯利, 郑益朋, 李冬冬, 巩稼民

西安邮电大学工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 通过在基于碳纳米管的掺铒锁模光纤激光器中加入啁啾光纤光栅, 实现了皮秒和飞秒孤子的可切换多波长锁模脉冲输出。通过调节偏振控制器, 分别在 1530.8, 1549.5, 1556.5 nm 三个波长处实现了多波长可切换锁模脉冲输出, 其中锁模脉冲的宽度分别为 833 fs, 7.43 ps 和 899 fs。以上三个波长的形成是由掺铒光纤的增益谱和啁啾光纤光栅的滤波效应共同决定的。本研究为实现多波长、不同规格脉冲宽度锁模激光器的设计提供了参考。

关键词 光纤光学; 多波长; 孤子; 锁模; 光纤激光器

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0506002

Switchable Multi-Wavelength Passively Mode-Locked All-Fiber Lasers

Han Dongdong*, Zhang Jiayue, Gao Qiong, Ren Kaili, Zheng Yipeng,

Li Dongdong, Gong Jiamin

*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an, Shaanxi 710121, China*

Abstract In this paper, we achieved the output of switchable multi-wavelength mode-locked pulses delivering picosecond and femtosecond solitons simultaneously by means of adding a chirped fiber Bragg grating (CFBG) into an erbium-doped mode-locked fiber laser based on carbon nanotubes. By adjusting a polarization controller, we output the switchable multi-wavelength mode-locked pulses near 1530.8 nm, 1549.5 nm, and 1556.5 nm, with the pulse duration of 833 fs, 7.43 ps, and 899 fs, respectively. In addition, the formation of the above three wavelengths could be jointly attributed to the gain spectra of the erbium-doped fibers and the filtering effect of CFBG. In conclusion, the study provides a reference for designing the multi-wavelength mode-locked fiber lasers with different pulse duration.

Key words fiber optics; multi-wavelength; solitons; mode locking; fiber lasers

OCIS codes 060.3510; 060.5530; 140.4050

1 引言

被动锁模光纤激光器由于其输出脉冲质量好、稳定性高、效率高和成本低等优点, 在光纤通信、超快激光加工、泵浦探测、太赫兹产生等领域有着非常重要的应用^[1-4]。其中锁模器件是被动锁模光纤激光器的一个重要器件, 常用的锁模器件一般包括基

于非线性干涉效应的人造可饱和吸收体和基于材料非线性可饱和吸收特性的可饱和吸收体两大类。人造可饱和吸收体的锁模技术包含非线性偏振旋转技术^[5-6]、“8”字腔技术^[7]以及单模-多模-单模干涉技术^[8]等, 这些技术是依靠光束偏振干涉形成的滤波效应来实现的, 具有结构简单、损伤阈值高等优点。但由于其偏振敏感, 受环境影响较大, 其应用受限。

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-01; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61805198)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ-227, 2019JQ-862)、西安市科技计划项目(2019218114GXRC017CG018-GXYD17.21)

* E-mail: handongdong@xupt.edu.cn

可饱和吸收体一般包括半导体可饱和吸收镜 (SESAM)^[9]、单壁碳纳米管^[10]、石墨烯^[11]、过渡金属硫化物^[12-14] 和黑磷^[15] 等。SESAM 是目前商用被动锁模光纤激光器使用最为广泛的锁模材料,但其损伤阈值低、带宽窄,同时由于其制造流程复杂,成本非常高^[16]。而单壁碳纳米管具有恢复时间快、饱和强度低、损伤阈值高、偏振不敏感、适用波长广、成本低等优点,相较于 SESAM 等其他锁模器件是一种理想的锁模材料^[17]。

另一方面,由于增益竞争效应的存在,被动锁模光纤激光器中一般只能输出单个波长。而多波长超快光纤激光器在光纤传感、光纤通信、生物成像等领域也有着重要应用^[18]。通常如果要在被动锁模光纤激光器中实现两个或者多个波长,需要在激光器中加入滤波器或者利用激光腔内的干涉滤波、增益滤波等^[19-21]。Liu 等^[22] 利用掺铒光纤的增益滤波效应在 L 波段实现了 1572.9 nm 和 1596.6 nm 的可切换双波长锁模脉冲输出。Zhang 等^[23] 利用双折射滤波效应在 SESAM 锁模光纤激光器中实现了三波长耗散孤子脉冲输出。Liu 等^[24] 利用三个啁啾光纤光栅作为滤波器,同时在各光纤光栅的中心波长处实现了三波长皮秒脉冲输出。以上研究的多波长锁模输出的脉冲宽度由于受激光器参数的限制,一般只是皮秒或飞秒脉冲中的一种。如何在一个激光器中实现不同波长同时输出不同量级脉冲宽度的研究还很少。

本文通过在基于单壁碳纳米管的掺铒光纤激光器中插入一个啁啾光纤光栅,实现了多波长皮秒和飞秒两种类型的锁模脉冲输出。实验中通过仔细调节偏振控制器,分别在 ~ 1530.8 nm、 ~ 1549.5 nm、 ~ 1556.5 nm 三个波长处实现了单波长、双波长、三

波长的可切换锁模脉冲输出。三个波长锁模脉冲的光谱宽度分别为 3.5 nm, 0.35 nm 和 3.8 nm, 脉冲宽度分别为 833 fs, 7.43 ps 和 899 fs。

2 实验装置

图 1 为实验中全光纤锁模光纤激光器的结构示意图。激光器由一个 980 nm 半导体激光器、一段 5 m 长的掺铒光纤、一个 980/1550 nm 波分复用器、一个 10% 输出耦合器、一个反射镜、一个偏振控制器、一个啁啾光纤光栅、一个三端口环行器、一个基于碳纳米管的锁模器以及各个器件尾纤的单模光纤组成。其中,980 nm 半导体激光器通过波分复用器将泵浦光输入到激光器内。环行器起到确保激光器单向运转以及将光纤光栅、偏振控制器以及反射镜连接至腔内两个作用。啁啾光纤光栅的中心波长为 1550 nm、带宽为 1 nm, 主要起到波长选择的作用。实验中,同时使用光谱分析仪、自相关仪、示波器以及频谱仪获取锁模脉冲的状态。

偏振控制器不仅可以调节光纤的偏振状态,使激光器锁模处于最佳状态,同时通过对偏振控制器内部光纤施加压力、弯曲等也可以调节光纤的损耗。实验中仔细调节啁啾光纤光栅和反射镜之间的偏振控制器,可以使光束在激光器中具有两个传输路径。当偏振控制器对其中光纤的损耗较大时,光束在环行器的传输路径为 1 \rightarrow 2 \rightarrow CFBG \rightarrow 3, 光束直接在啁啾光纤光栅处反射回腔内,无法到达偏振控制器后的反射镜。而当偏振控制器对光纤造成的损耗较小时,光束在环行器的传输路径为 1 \rightarrow 2 \rightarrow CFBG \rightarrow 反射镜 \rightarrow 3, 光束可以透过啁啾光纤光栅和偏振控制器达到反射镜后再反射回腔内。

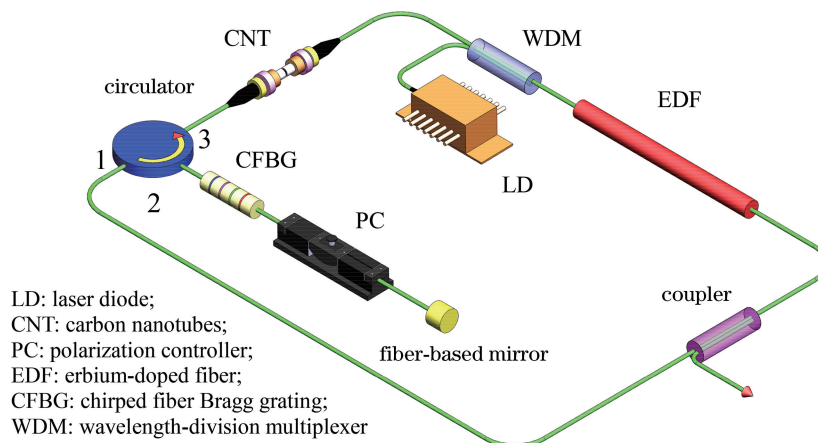


图 1 实验中锁模光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

3 实验结果与讨论

实验中保持泵浦功率的大小不变,通过调节偏振控制器,可以分别在 1530.8 nm, 1549.5 nm 和 1556.5 nm 处实现单波长锁模。图 2 为当泵浦功率约为 90 mW 时实验得到的单波长锁模状态输出的脉冲曲线。其中:图 2(a)~(c)为三个波长的锁模状态光谱,可以看出光谱两侧均有边带存在,符合传统孤子锁模的特性。三个波长锁模光谱的 3 dB 带宽分别为 3.5 nm,0.35 nm 和 3.8 nm。其中由于光纤光栅的滤波效应,在 1549.5 nm 处得到的锁模状态的光谱比其他波长的要窄很多。图 2(d)~(f)为三个波长锁模的自相关曲线,其半峰全宽分别为 1.28 ps,11.4 ps 和 1.38 ps。利用 sech^2 曲线对其进行拟合,可以得到锁模脉冲的宽度分别为 833 fs, 7.43 ps 和 899 fs。因此,可以计算得到三个波长锁模脉冲的时间带宽积分别为 0.36,0.32 和 0.42。

可以看出三个波长锁模脉冲的时间带宽积接近 sech^2 脉冲的极限值 0.315。从以上可以看出,在三个波长处得到的锁模脉冲都是标准的传统孤子脉冲。图 2(g)~(i)为三个波长锁模脉冲频谱的基频曲线,其大小分别为 5.17346 MHz,6.057899 MHz 和 5.173143 MHz。基频曲线的信噪比分别为 ~ 50 dB, ~ 60 dB 和 ~ 50 dB。图 2(f)内插图为 1556.5 nm 波长下锁模的大范围频谱曲线。从以上数据可以看出在三个波长处得到的传统孤子状态都是稳定的锁模脉冲。此外,图 2(g)~(i)内插图分别为三个波长锁模的示波器曲线,可以看出 1549.5 nm 下的锁模是单脉冲锁模,而 1530.8 nm 和 1556.5 nm 下的锁模分别是双脉冲和多脉冲锁模,这说明这两个波长下的锁模脉冲已经发生分裂。三个单波长锁模下输出的平均功率分别为 1.23 mW,1.27 mW 和 1.24 mW。

实验中,保持泵浦功率大小不变并微调偏振控

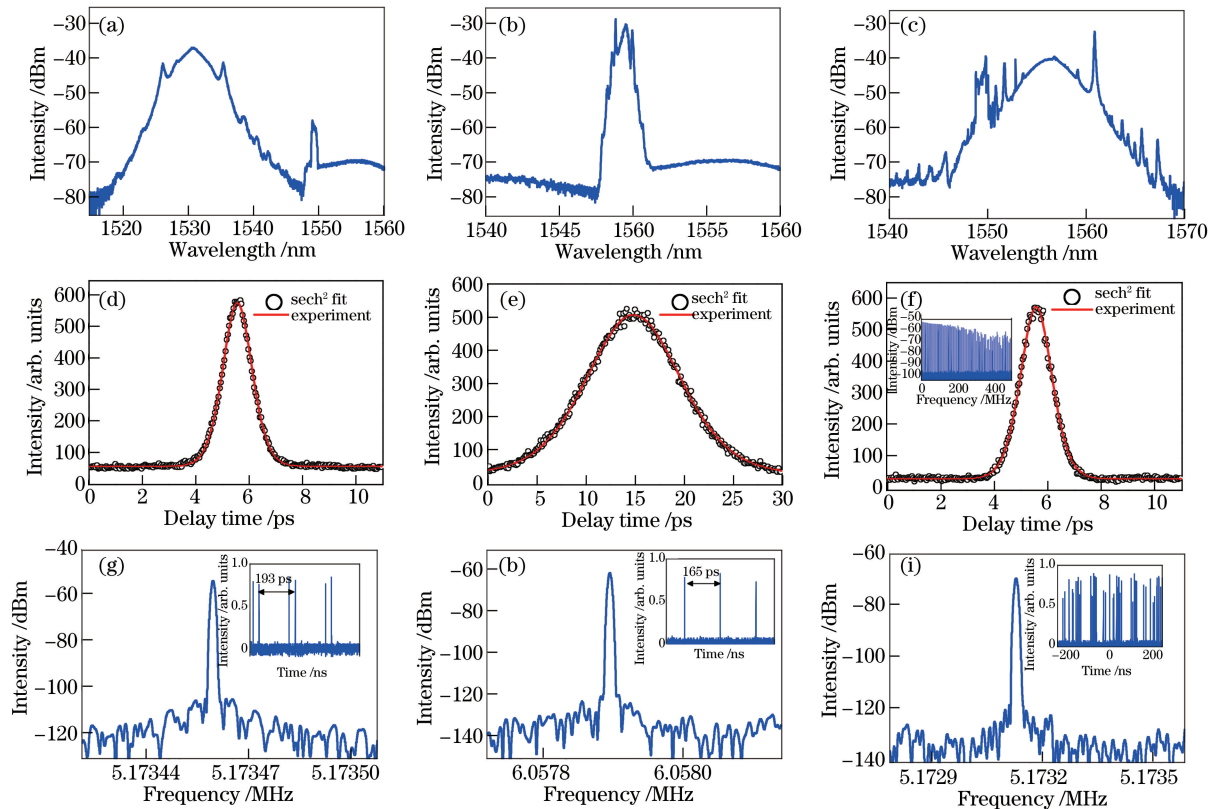


图 2 单波长锁模状态下的脉冲输出特性。(a)(b)(c) 1530.8 nm、1549.5 nm 和 1556.5 nm 锁模态的光谱;(d)(e)(f)对应的自相关曲线,其中(f)中的插图为 1556.5 nm 锁模大范围频谱的基频曲线;(g)(h)(i)对应频谱的基频曲线,其中插图分别为 1530.8 nm、1549.5 nm 和 1556.5 nm 锁模下的示波器曲线

Fig. 2 Pulse output characteristics of the single-wavelength mode locking. (a) (b)(c) Spectra at 1530.8 nm, 1549.5 nm, and 1556.5 nm, respectively; (d)(e)(f) corresponding AC traces, and the inset in Fig.2 (f) is the RF trace in large range at 1556.5 nm; (g) (h) (i) corresponding RF traces, in which the insets are the corresponding oscilloscope traces at 1530.8 nm, 1549.5 nm and 1556.5 nm, respectively

制器,可以在原单波长锁模的基础上分别得到双波长锁模态,如图 3 所示。其中,图 3(a)和图 3(d)分别为 1530.8 nm-1556.5 nm 双波长锁模态的光谱和示波器曲线。从光谱上可以看到,两个波长的锁模光谱都还在原来单波长锁模的位置上,而在 1549.5 nm 周围由于光纤光栅的滤波效应,也有反射谱存在,但未形成锁模。从示波器脉冲曲线可以看出,示波器上存在两个强度不等的脉冲序列,可以通过调节偏振控制器过程中单波长和双波长锁模下脉冲数目和强度的变化进行判定,其中强度较高的双脉冲态对应 1530.8 nm 的锁模脉冲,强度较低的多脉冲态对应 1556.5 nm 的锁模脉冲,双波长锁模

状态与单波长锁模的状态相一致。图 3(b)和图 3(e)分别为 1530.8 nm-1549.5 nm 双波长锁模态的光谱和示波器曲线。此时,在光纤光栅对应的 1549.5 nm 附近形成了锁模脉冲。从示波器上也可以观测到两个强度不等的脉冲序列,强度较高的单脉冲态对应 1549.5 nm 的锁模脉冲,强度较低的双脉冲态对应 1530.8 nm 的锁模脉冲。图 3(c)和图 3(f)分别为 1549.5 nm-1556.5 nm 双波长锁模态的光谱和示波器曲线。同样,从示波器上也可以观测到两个强度不等的脉冲序列,强度较高的单脉冲态对应 1549.5 nm 的锁模脉冲,强度较低的多脉冲态对应 1556.5 nm 的锁模脉冲。

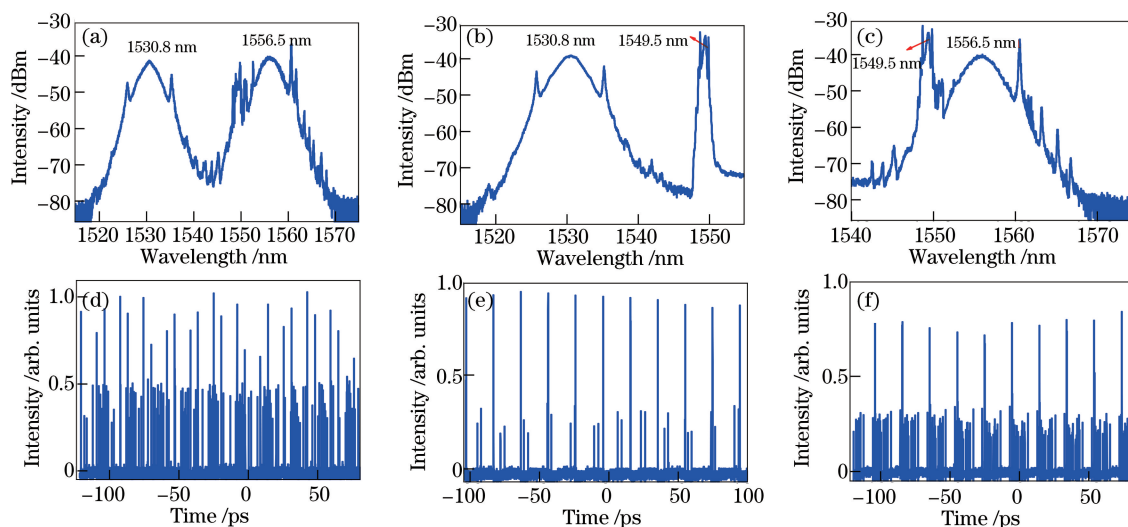


图 3 双波长锁模状态下的光谱、示波器输出特性。(a)(b)(c) 1530.8 nm-1556.5 nm、1530.8 nm-1549.5 nm 和 1549.5 nm-1556.5 nm 双波长锁模的光谱;(d)(e)(f)相对应的示波器脉冲曲线

Fig. 3 Spectra and oscilloscope traces of the dual-wavelength mode locking. (a)(b)(c) Spectra at 1530.8 nm-1556.5 nm, 1530.8 nm-1549.5 nm, and 1549.5 nm-1556.5 nm mode-locking states, respectively; (d)(e)(f) corresponding oscilloscope traces

继续调节偏振控制器并同时保持泵浦功率在 90 mW 左右时,实验中可以实现三波长锁模输出,如图 4 所示。图 4(a)为三波长锁模的光谱曲线,可以观察到此时在 1530.8 nm, 1549.5 nm 和 1556.5 nm 处同时到达了锁模状态。图 4(b)为三

波长锁模状态的脉冲曲线。从中可以观察到,此时示波器中有三个强度不等的脉冲曲线序列。其中,强度最高的单脉冲序列对应于 1549.5 nm 锁模状态,强度居中的双脉冲序列对应于 1530.8 nm 锁模态,强度较低的多脉冲序列对应于 1556.5 nm 锁模

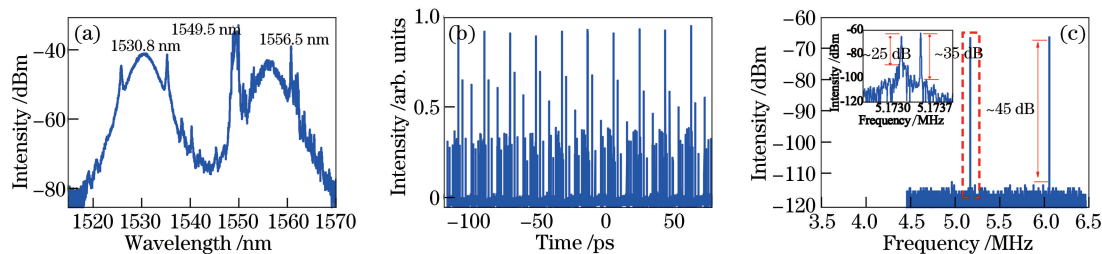


图 4 三波长锁模状态下的脉冲光谱特性。(a)光谱;(b)示波器;(c)频谱输出特性,(c)插图中为频谱的放大曲线
Fig. 4 Pulse output characteristics of the triple-wavelength mode locking. (a) Spectrum; (b) oscilloscope trace; (c) RF spectrum, in which the inset is the close-up from the box

态。图 4(c)为三波长锁模态频谱的基频曲线。两个基频曲线对应的值分别为 5.1729 MHz 和 6.0579 MHz。其中 6.0579 MHz 曲线对应 1549.5 nm 处的锁模脉冲,而 5.1729 MHz 对应 1530.8 nm 和 1556.5 nm 处的锁模脉冲。由于这两个波长的腔长相同,只是基频有微弱的差别,因此这两波长在大范围下无法分辨。将 5.1729 MHz 下的曲线进行范围放大,如图 4(c)内插图所示,可以得到 1530.8 nm 和 1556.5 nm 处锁模脉冲的基频曲线,其基频的大小分别为 5.173462 MHz 和 5.173141 MHz。此时,在 1556.5 nm 的锁模状态由于受到其他两个波长锁模的干扰,其光谱不是非常光滑,但从示波器和频谱曲线可以看出,锁模仍处于较为稳定的状态。

掺铒光纤的增益谱在 1530 nm 和 1556 nm 附近有两个峰值,一般通过调节偏振控制器可以在这两个波长上实现锁模,实验中如图 3(a)所示。在激光器中加入了一个滤波器件,即 1550 nm 啁啾光纤光栅,对激光器来说,这相当于多了一个可以实现锁模的波长。实验中,通过微调偏振控制可以调节激光器中的偏振状态以及损耗。当损耗较大时,光束无法到达反射镜,而是直接在啁啾光纤光栅处反射,因此在反射光的中心波长 1549.5 nm 处可以实现单波长锁模,在光栅色散和滤波效应的影响下,此时输出光为皮秒脉冲输出。当偏振控制器造成的损耗较小时,光束可以到达反射镜,这时在增益竞争的作用下激光器就可以在 1530.8 nm 或 1556.5 nm 处形成锁模状态。由于在这两处不受光栅滤波和色散的影响,输出光均为飞秒脉冲输出。同时,通过微调激光器内泵浦、损耗等,激光器可以在三个波长处具有相当的增益系数,在三个波长处同时呈锁模状态。

4 结 论

报道了基于碳纳米管锁模的可切换多波长全光纤超快激光器。同时,由于在激光器中插入了啁啾光纤光栅,不同波长形成的锁模脉冲宽度也可以在皮秒和飞秒量级间进行切换。通过微调偏振控制器,分别在 1530.8 nm、1549.5 nm、1556.5 nm 三个波长处实现了可切换单波长、双波长和三波长的锁模脉冲输出。三个波长下锁模脉冲的宽度分别为 833 fs、7.43 ps 和 899 fs。本文对不同锁模脉冲宽度、多波长光纤激光器的研究有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [2] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, et al. Space-borne frequency comb metrology [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1381-1387.
- [3] Xu C, Wise F W. Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 875-882.
- [4] Wei Z W, Liu M, Cui H, et al. Recent progress of soliton transient dynamics in ultrafast fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 070006.
魏志伟, 刘萌, 崔虎, 等. 超快光纤激光器中孤子瞬态动力学特性研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 070006.
- [5] Iegorov R, Teamir T, Makey G, et al. Direct control of mode-locking states of a fiber laser [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1312-1315.
- [6] Zhu X J, Geng J, Zhang G A, et al. Tunable double pulse dissipative solitons Yb-doped fiber laser based on sagnac loop [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0414002.
朱晓军, 耿健, 章国安, 等. 基于 Sagnac 环的可调谐双脉冲耗散孤子掺 Yb 光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0414002.
- [7] Liu W, Shi H S, Cui J H, et al. Single-polarization large-mode-area fiber laser mode-locked with a nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2848-2851.
- [8] Yang F, Wang D N, Wang Z K, et al. Saturable absorber based on a single mode fiber-graded index fiber-single mode fiber structure with inner micro-cavity [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 927-934.
- [9] Luo Y, Cheng J, Liu B, et al. Group-velocity-locked vector soliton molecules in fiber lasers [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2369.
- [10] Hu G Q, Pan Y L, Zhao X, et al. Asynchronous and synchronous dual-wavelength pulse generation in a passively mode-locked fiber laser with a mode-locker [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4942-4945.
- [11] Lau K Y, Abu Bakar M H, Muhammad F D, et al. Dual-wavelength, mode-locked erbium-doped fiber laser employing a graphene/polymethyl-methacrylate saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12790-12800.
- [12] Zhan Y, Wang C C. Nanosecond pulse generation in a MoS₂ mode-locked ytterbium-doped fiber laser [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(2): 1-7.
- [13] Guo B. 2D noncarbon materials-based nonlinear optical devices for ultrafast photonics [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(2): 020004.
- [14] Jiang T, Yin K, Wang C, et al. Ultrafast fiber lasers

[1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J].

- mode-locked by two-dimensional materials: review and prospect[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(1): 78-90.
- [15] Chen Y, Chen S Q, Liu J, et al. Sub-300 femtosecond soliton tunable fiber laser with all-anomalous dispersion passively mode locked by black phosphorus[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13316-13324.
- [16] Hasan T, Sun Z P, Wang F Q, et al. Nanotube-polymer composites for ultrafast photonics [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21: 3874-3899.
- [17] Yamashita S, Martinez A, Xu B. Short pulse fiber lasers mode-locked by carbon nanotubes and graphene [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(6): 702-713.
- [18] Zheng S K, Yang K W, Ao J P, et al. Advances in fiber laser sources for coherent Raman scattering microscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508008.
郑世凯, 杨康文, 敖建鹏, 等. 光纤式相干拉曼散射成像光源研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508008.
- [19] Yan Z J, Wang H S, Zhou K M, et al. Soliton mode locking fiber laser with an all-fiber polarization interference filter[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4522-4524.
- [20] Luo A P, Luo Z C, Xu W C. Switchable dual-wavelength passively mode-locked fiber ring laser using SESAM and cascaded fiber Bragg gratings[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(2): 395-398.
- [21] Wang X F, Liu J H, Jin Z G. State-switchable multi-wavelength and dissipative soliton mode-locked Tm-doped fiber laser based on a combination of nonlinear amplifying loop mirror and Lyot filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 0414001.
王小发, 刘经惠, 靳增高, 等. 基于非线性放大环镜和 Lyot 滤波器的多波长与耗散孤子锁模态开关型掺铥光纤激光器 [J]. *光子学报*, 2020, 49(4): 0414001.
- [22] Liu H H, Jiang Q, Song W, et al. L-band switchable dual-wavelength passively mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701007.
刘灿灿, 蒋巧, 宋伟, 等. L 波段可切换双波长被动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0701007.
- [23] Zhang H, Tang D Y, Wu X, et al. Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12692-12697.
- [24] Liu X, Han D, Sun Z, et al. Versatile multi-wavelength ultrafast fiber laser mode-locked by carbon nanotubes [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2718.