

doi: 10. 3788/gzxb20164510. 1014002

基于单壁碳纳米管的双向锁模掺铒光纤激光器

王士忠, 张祖兴, 胡芳仁

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023)

摘 要:设计了一种没有隔离器的单壁碳纳米管双向被动锁模光纤孤子激光器. 该光纤激光器由波分复用器、掺铒光纤、光耦合器、碳纳米管、单模光纤和偏振控制器组成. 在环形腔的两个相反方向上, 同时实现基于碳纳米管饱和吸收体的被动锁模, 得到两个反向稳定脉冲序列. 调节激光腔中的偏振控制器以及泵浦光源, 分析该实验装置在不同泵浦功率下的输出特性. 结果表明, 中心波长变化范围为 1 558~1 560 nm, 顺时针脉冲宽度变化范围为 854~959 ps, 逆时针脉冲宽度变化范围为 247~624 ps. 此外, 泵浦功率较大时, 逆时针方向上脉冲序列分裂.

关键词:单壁碳纳米管; 被动锁模; 光纤孤子激光器; 隔离器; 双折射

中图分类号: TN242

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1014002-6

Bidirectional Erbium-doped Fiber Laser Mode-locked by Single-wall Carbon Nanotubes

WANG Shi-zhong, ZHANG Zu-xing, HU Fang-ren

(School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The bidirectional operation of a single-wall carbon nanotube-based passively mode-locked erbium-doped soliton fiber laser without isolator, is demonstrated with stable output pulse trains simultaneously from both directions of the laser cavity. The fiber laser consists of wavelength division multiplexer, erbium-doped fiber, optical coupler, carbon nanotube, single-mode fiber and polarization controller. By adjusting the pump power and polarization controller to analyse the output characteristics of experimental device under different pump powers, the center wavelengths of the two opposite pulses can be changed from 1 558~1 560 nm. The clockwise pulse width can be varied from 854~959 ps. The counter clockwise pulse width can be changed from 247~624 ps. Especially, the pulse split of the counterclockwise pulse trains has been observed.

Key words: Single-wall carbon nanotube; Passive mode-locked; Soliton fiber laser; Isolator; Birefringence

OCIS Codes: 140.3500; 140.3510; 140.4050

0 引言

被动锁模光纤激光器在光纤通信、光谱学和非线性光学等领域中应用广泛. 它们可以产生超快脉冲^[1]、宽带光谱^[2]和超窄激光光源等. 被动锁模可以运用非

线性偏振旋转 (Nonlinear Polarization Rotation, NPR)^[3]、非线性放大环境 (Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM)^[4]、半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)^[5]、单壁碳纳米管 (Single-walled Carbon

基金项目:国家自然科学基金 (Nos. 61274121, 61574080)、江苏省自然科学基金 (No. BK20161521)、江苏省特聘教授资助项目 (No. RK002STP14001)、江苏省“六大人才高峰”资助项目 (No. 2015-XCL-023) 和南京邮电大学人才引进项目 (Nos. NY214002, NY215002) 资助

第一作者:王士忠 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高速光通信与仿生光通信. Email: wangsz1595201@163.com

导师:胡芳仁 (1973-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为可见光传感器与新型光电集成器件. Email: hufar@njupt.edu.cn

通讯作者:张祖兴 (1975-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光技术, 光纤传感及光信号处理. Email: zxzhang@njupt.edu.cn

收稿日期:2016-05-03; **录用日期:**2016-07-25

<http://www.photon.ac.cn>

Nanotube, SWNT)^[1,6]、石墨烯^[7-8]以及石墨烯纳米管混合物^[9]等不同技术来实现. 基于 NPR 效应, 在锁模光纤激光器中可以观察到传统孤子、耗散孤子 (Dissipative Solitons, DS)、高能量脉冲^[10]和无波分裂脉冲. 不同类型的脉冲也可以从不同的腔体中获得^[11-12]. 在反常色散区, 反常腔色散和光纤非线性光学效应相互平衡, 形成传统孤子. 不同色散光纤组成的色散管理光纤激光器具有交替改变的正负色散, 能增加脉冲能量和减少脉冲宽度. 事实上, 正负色散交替可以周期性拉伸和压缩腔内脉冲, 并且有效地减少腔内平均峰值功率. 因此, 相比传统孤子操作, 减少非线性光学效应, 可以让脉冲积累较大的能量. 此外, 在净正常色散区域, 锁模光纤激光器中可以观察到自相似脉冲和耗散孤子脉冲^[13]. 这是正常腔色散、克尔非线性效应、增益带宽滤波的综合作用下形成的自相似脉冲或耗散孤子. 单壁碳纳米管具有亚皮秒的恢复时间、低饱和度和偏振不敏感、较宽的工作波长范围、容易制备等特点, 因此基于碳纳米管锁模的光纤激光器得到广泛的关注和研究. Rozhin 等展示了一个基于碳纳米管锁模光纤激光器, 在中心波长 1 560 nm 产生了 178 fs 短脉冲^[14]. 2015 年, Z. Zhang 等运用光子晶体光纤进行色散和非线性管理, 从碳纳米管锁模掺铒光纤激光器中得到了 118 fs 的耗散孤子脉冲^[15]. 2016 年, Kuan 等运用 SESAM, 在掺铒光纤激光器内实现被动锁模^[16].

通常, 为了减少杂散腔反射和降低自启动锁模阈值, 被动锁模光纤激光器要运用光隔离器. 但是, 这类锁模光纤激光器是单向环形, 只能产生单方向锁模脉冲. 另一方面, 双向锁模激光器在各种传感应用设备中具有吸引力. 锁模形式的陀螺仪可以有效减少纵模碰撞谱线宽度, 提高陀螺仪的灵敏度, 双向锁模形式可以提供两个不同的连续光脉冲序列, 与陀螺仪旋转频率成线性关系, 可以提供有效的信号处理. 因此, 基于单壁碳纳米管的双向锁模掺铒光纤激光器在实际应用中具有一定的研究价值^[17]. 1967 年, Buholz 和 Chodorow 运用双向锁模激光器制造陀螺仪传感器^[18]. 接着, 基于双向被动锁模光纤激光器的各种陀螺仪传感器相继诞生. 2008 年, Kieu 和 Mansuripur 提出了全光纤双向被动锁模环形激光器^[19], 运用碳纳米管/聚合物复合材料内嵌入光纤连接器中, 用作饱和吸收以实现双向锁模. 最近, Ouyang 等提出采用两个 SESAMs 实现双向锁模^[20]; Cui 和 Liu 运用石墨烯纳米管混合物在双向光纤激光器中观察到了耗散孤子与传统孤子的产生^[21].

本文实验研究了基于单壁碳纳米管的双向锁模掺铒光纤 (Erbium-doped Fiber, EDF) 激光器. 激光器中没有隔离器, 可以同时两个方向 (顺时针方向和逆时针方向) 产生稳定的锁模脉冲.

1 实验装置

双向单壁碳纳米管锁模光纤激光器结构示意图如图 1. 环形腔由长度约 30 cm、在 1 560 nm 处色散参量约为 $-52 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的掺铒光纤 (1 530 nm 处的峰值吸收率为 $80 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$), 和长度约 244.5 cm、在 1 560 nm 处色散参量约为 $17.9 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的标准单模光纤 (Single-mode Fiber, SMF) 组成. 在光纤激光器内, 以聚酰胺为衬底的单壁碳纳米管作为饱和吸收体, 插入光纤连接器中以产生锁模脉冲. 单壁碳纳米管和聚酰胺混合物薄膜约为 2 mm^2 , 聚酰胺的分解温度高达 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 这表明该聚合物具有较高的耐热性^[22], 同时聚酰胺薄膜具有光学透明性. 两个光纤连接器之间的插入损耗约为 1.5 dB. 偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 用来优化锁模条件. 除此之外, 腔内还有 980 nm/1 550 nm 波分多路复用器; 2×2 的光耦合器, 其中耦合比为 10 : 90, 分别作为顺时针方向及逆时针方向的输出端口; 光谱分析仪和数字存储示波器分别用于观测脉冲谱域和时域输出特性.

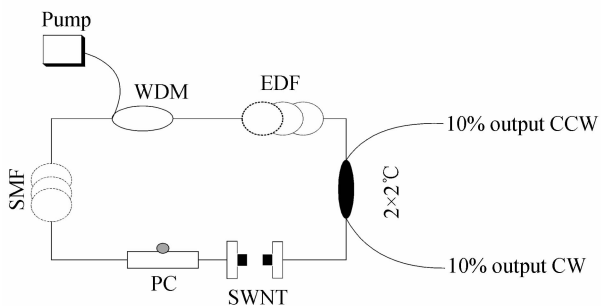


图 1 双向单壁碳纳米管锁模光纤激光器结构
Fig. 1 The structure of bidirectional erbium-doped fiber laser mode-locked by single-wall carbon nanotubes

2 实验结果和分析

当泵浦功率超过阈值时, 调节偏振控制器, 顺时针方向 (Clockwise, CW) 和逆时针方向 (Counterclockwise, CCW) 的锁模模式会同时出现. 图 2(a) 中, 当泵浦功率为 114.6 mW 时, 示波器出现明显的振荡, 调节偏振控制器使之稳定, 用光谱仪分别测量顺时针方向和逆时针方向脉冲光谱图.

顺时针方向和逆时针方向脉冲中心波长分别为 1 558.30 nm 和 1 558.46 nm, 3 dB 带宽分别为 $\sim 15.6 \text{ nm}$ 和 $\sim 14.0 \text{ nm}$. 由于激光器接近零色散, 其输出频谱具有较宽的带宽, 并且没有边带, 其剖面图为典型的高斯图形, 这是典型展开脉冲的特征^[23]. 并且由功率计测得, 顺时针脉冲平均功率为 $531.5 \mu\text{W}$, 逆时针脉冲平均功率为 $91.74 \mu\text{W}$. 由于顺时针脉冲先经过增益光纤, 紧接着经过耦合器输出端输出; 与顺时针脉冲相比, 逆时针脉冲经过增益光纤后, 经过其它器件,

此过程中有一定的损耗, 最终到达耦合器的输入端, 因此顺时针脉冲功率大于逆时针脉冲功率。

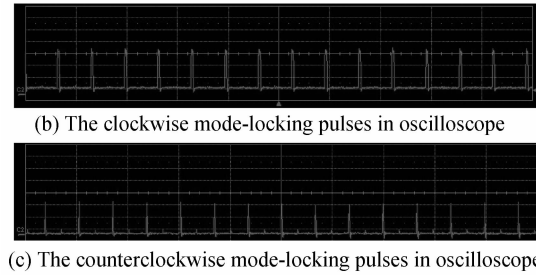
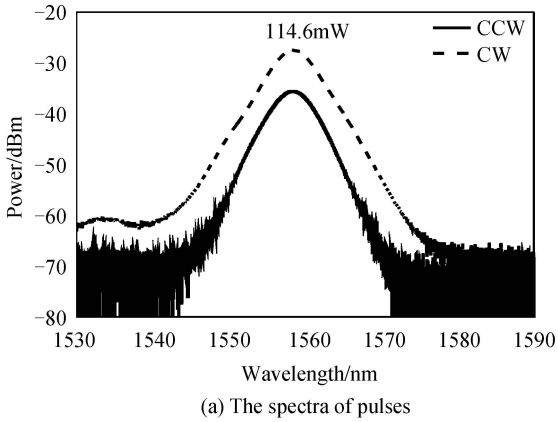


图 2 泵浦功率为 114.6 mW 时, 两不同方向锁模脉冲光谱图以及时域图
Fig. 2 The spectra and time domain of bidirectional mode-locking pulses when the pump power is 114.6 mW

图 2(b) 及图 2(c) 所示, 顺时针方向以及逆时针方向脉冲重复频率分别为 ~ 75.775 MHz 和 ~ 75.810 MHz. 由于示波器分辨率有限, 逆时针方向脉冲带宽约为 247 ps, 顺时针方向脉冲带宽约为 854 ps. 基于上述结果, 推断光纤激光器处于稳定的锁模模式。

当泵浦功率加大为 132.6 mW 时, 顺时针方向和逆时针方向脉冲光谱如图 3(a). 顺时针方向和逆时针方向脉冲中心波长分别为 1558.17 nm 和 1558.32 nm, 3 dB 带宽分别为 ~ 16.3 nm 和 ~ 14.6 nm. 顺时针脉冲功率为 693.3 μ W, 逆时针脉冲功率为 163.2 μ W.

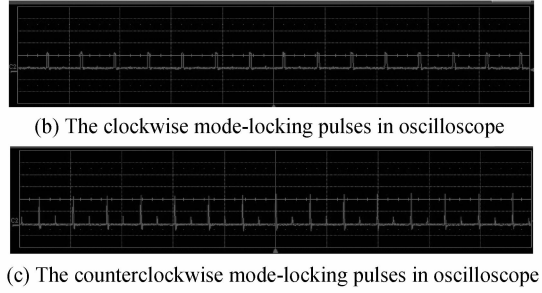
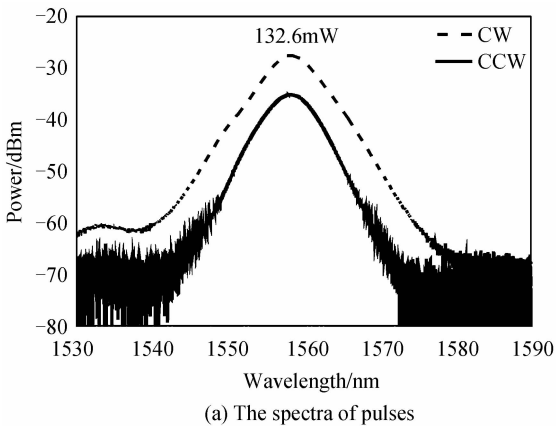


图 3 泵浦功率为 132.6 mW 时, 两不同方向锁模脉冲光谱图以及时域图
Fig. 3 The spectra and time domain of bidirectional mode-locking pulses when the pump power is 132.6 mW

图 3(b) 及图 3(c) 中, 顺时针方向以及逆时针方向重复脉冲频率分别为 ~ 75.812 MHz 和 ~ 75.800 MHz. 图 3(c) 中, 逆时针方向有稳定的脉冲串, 其脉冲宽度约为 234 ps; 图 3(b) 中, 顺时针方向脉冲串同样稳定, 其脉冲宽度约为 889 ps. 但由于泵浦功率的增加, 激光腔的不对称性更明显, 顺时针输出脉冲功率更大, 逆时针输出脉冲功率更小. 值得注意的是, 逆时针脉冲中出现了脉冲分裂现象, 两相邻脉冲之前有一个小脉冲。

继续增大泵浦功率, 当泵浦功率为 139 mW 时, 顺时针方向和逆时针方向脉冲光谱图如图 4(a). 顺时针

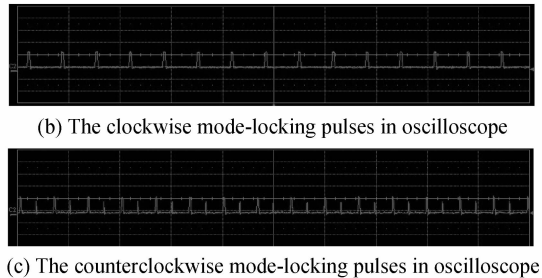
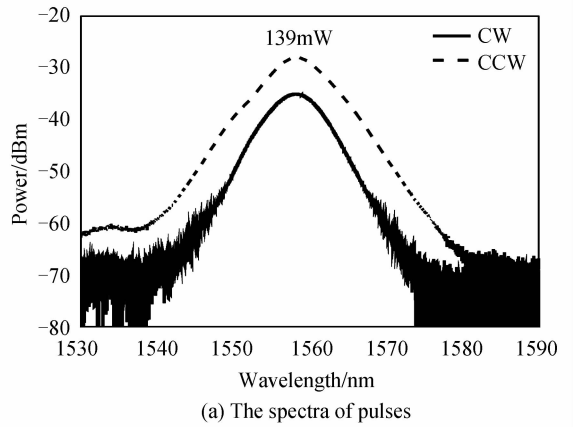
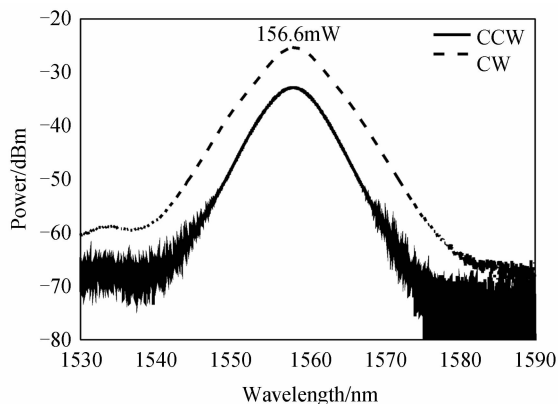


图 4 泵浦功率为 139 mW 时, 两不同方向锁模脉冲光谱图以及时域图
Fig. 4 The spectra and time domain of bidirectional mode-locking pulses when the pump power is 139 mW

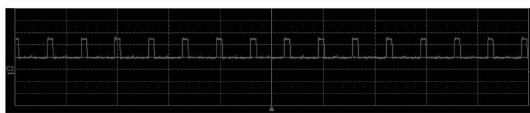
方向和逆时针方向脉冲中心波长分别为 1558.30 nm 和 1558.12 nm, 3 dB 带宽分别为 ~ 16.6 nm 和 ~ 14.8 nm. 顺时针脉冲功率为 742.1 μ W, 逆时针脉冲

功率为 $176.6 \mu\text{W}$. 时域如图 4(b)及图 4(c)所示, 顺时针方向腔内只有 1 个脉冲串, 重复脉冲频率为 $\sim 75.762 \text{ MHz}$, 其脉冲宽度约为 959 ps , 逆时针方向脉冲分裂现象更明显, 腔内有 2 个脉冲串, 重复脉冲频率为 $\sim 145.39 \text{ MHz}$, 主脉冲宽度约为 624 ps . 相比较泵浦功率为 132 mW 时的小脉冲, 逆时针相邻脉冲串之间的小脉冲已十分明显, 而顺时针脉冲依然没有分裂的现象.

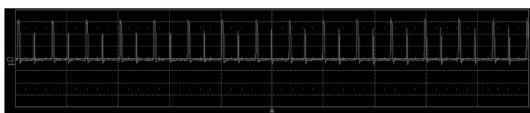
当泵浦功率为 156.6 mW 时, 顺时针方向和逆时针方向脉冲光谱图如图 5(a). 顺时针方向和逆时针方向脉冲中心波长为 1559.25 nm 和 1559.34 nm , 3 dB 带宽分别为 $\sim 17.4 \text{ nm}$ 和 $\sim 15.2 \text{ nm}$. 顺时针脉冲功率为 $844.1 \mu\text{W}$, 逆时针脉冲功率为 $196.0 \mu\text{W}$. 图 5(b)及图 5(c)中, 随着泵浦功率的进一步增加, 顺时针方向脉冲宽度以及逆时针方向脉冲宽度逐渐变宽, 逆时针方向上光子分裂的状况越来越明显. 由于碳纳米管器件在成膜过程中用到聚合物材料, 过高的泵浦功率会击穿并损坏碳纳米管器件, 限制了这类激光器的输出功率和脉冲能量, 因此本实验最高泵浦功率为 156.6 mW .



(a) The spectra of pulses



(b) The clockwise mode-locking pulses in oscilloscope

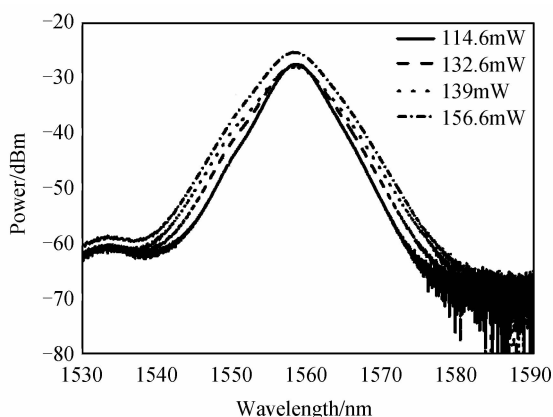


(c) The counterclockwise mode-locking pulses in oscilloscope

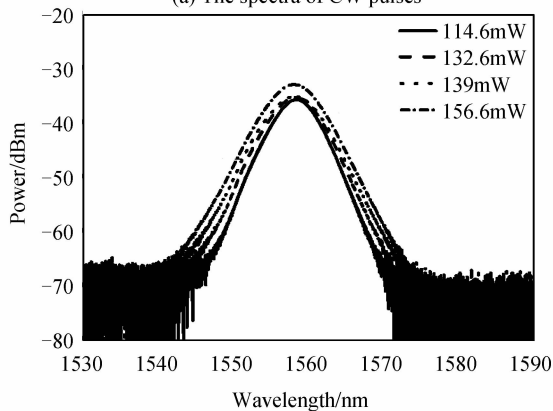
图 5 泵浦功率为 156.6 mW 时, 两不同方向锁模脉冲光谱图及时域图

Fig. 5 The spectra and time domain of bidirectional mode-locking pulses when the pump power is 156.6 mW

如图 6 所示, 随着泵浦功率增加, 顺时针方向以及逆时针方向光谱功率峰值增加, 同时光谱谱宽也会增加. 原因是, 增加泵浦功率, 在光子形成过程中, 增强的脉冲能量导致光谱带宽变宽. 同一泵浦功率下, 顺时针方向光谱谱宽比逆时针方向谱宽要宽, 与逆时针方向脉冲相比, 顺时针方向脉冲先经过增益光纤, 然后从耦合器输出. 输出之前相比逆时针方向脉冲, 由于自相位调制, 因此积累更多的非线性相移, 这就是顺时针方向脉冲具有更广泛光谱带宽的原因.



(a) The spectra of CW pulses

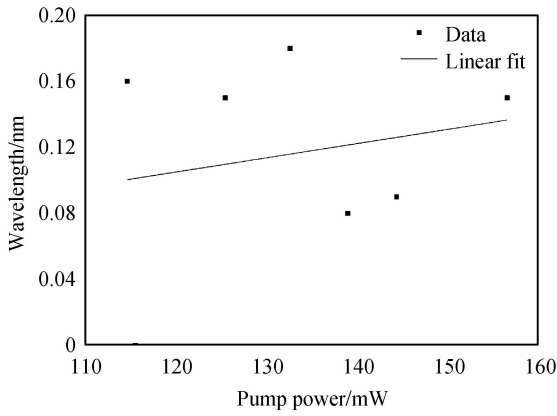


(b) The spectra of CCW pulses

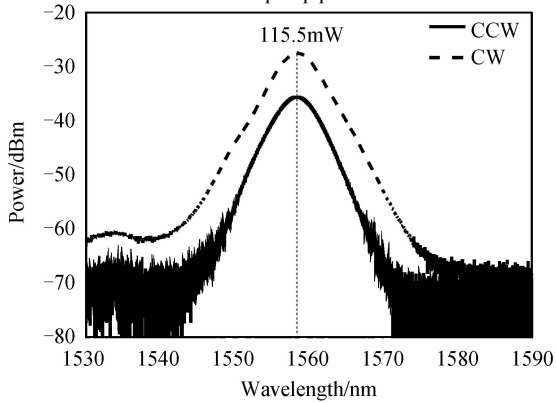
图 6 不同泵浦功率下, 顺时针方向以及逆时针方向脉冲光谱图

Fig. 6 The spectra of clockwise and the counterclockwise pulses under different pump powers

一般情况下, 根据所测的实验数据, 如图 7(a), 双向脉冲通常具有不同的中心波长, 并且随着泵浦功率的增加, 中心波长差缓慢增加. 但调节泵浦功率到合适的值时, 可以使两方向上的中心波长相同, 如图 7(b), 本文调节泵浦功率到 115.5 mW 时, 双向脉冲中心波长都在 1558.31 nm 处.



(a) The relationship between center wavelength difference and pump power

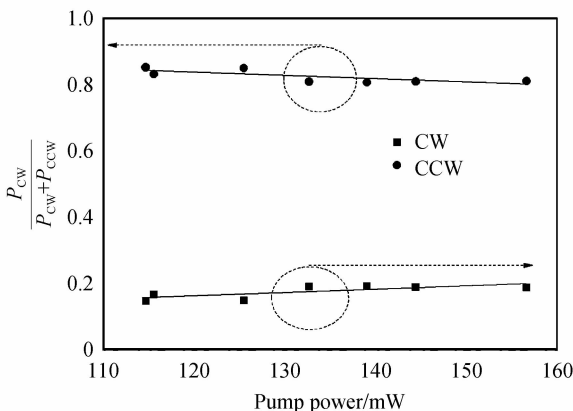


(b) The spectra of pulses

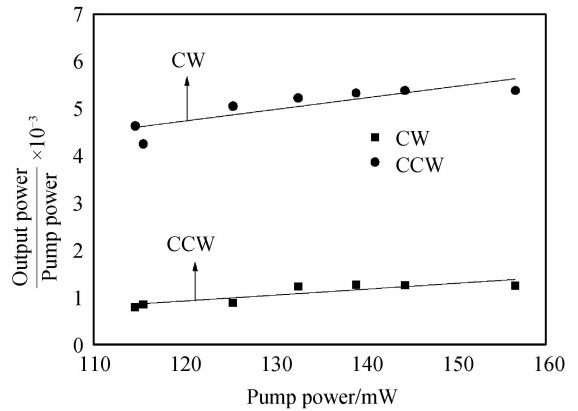
图 7 不同泵浦功率下, 双向锁模脉冲中心波长差与泵浦功率的关系

Fig. 7 The relationship between center wavelength difference of bidirectional mode-locking pulses and pump power under different pump powers

图 8(a) 中, 增加泵浦功率, 顺时针方向输出功率以及逆时针方向输出功率之和也在增加, 但顺时针方向以及逆时针方向占总输出功率的比值几乎保持恒定, 而且顺时针方向功率占总输出功率大于 80%, 逆时针方向功率占总输出功率小于 20%。图 8(b) 中, 同一泵浦功率下, 顺时针方向的输出功率大于逆时针方向的输出功率。通过增加泵浦功率, 顺时针方向及逆时针方



(a) The relationship between P_{cw} or P_{ccw} and pump power



(b) The relationship between output power and pump power

图 8 不同泵浦功率下, 两不同方向输出功率与泵浦功率关系

Fig. 8 The relationship between bidirectional output powers and pump power under different pump powers
向输出功率近似线性增加, 并且两者的增长情况近似相同。

两不同方向锁模脉冲通常具有不同的中心波长, 脉冲持续时间和重复率。这是由激光腔的不对称性引起的^[23], 导致不同的脉冲特征, 但可以调节泵浦功率, 使两不同方向锁模脉冲的中心波长重合。光纤的双折射也在脉冲特性的形成中起着重要的作用。从图 6 可以看出, 偏振控制器可以影响光纤双折射, 从而改变两不同方向锁模脉冲的中心波长。

3 结论

基于单壁碳纳米管双向锁模的掺铒光纤激光器可以得到两个不同方向的锁模脉冲。两个不同方向的锁模脉冲中心波长通常不同, 但调节泵浦功率, 可使两个不同方向的锁模脉冲中心波长在某一波长处重合, 实现同中心波长双向锁模。同一泵浦功率下, 顺时针方向光谱谱宽比逆时针方向谱宽要宽, 顺时针方向光谱功率峰值高于逆时针方向光谱功率峰值。改变泵浦功率大小, 顺时针方向以及逆时针方向光谱功率峰值均增加, 同时光谱谱宽也会变宽, 并且改变两个不同方向锁模脉冲的中心波长差, 中心波长差趋向增加。增大泵浦功率的同时, 两个不同方向上的输出功率占总输出功率的比值几乎保持恒定, 两个不同方向输出功率随泵浦功率增加近似线性增大, 并且两者的增长情况近似相同。随着泵浦功率的增加, 逆时针方向上易产生脉冲分裂, 并且随泵浦功率的增加越来越明显。腔不对称性和光纤双折射对这些独特的性能形成起关键作用。

参考文献

- [1] LIU Xue-ming. Interaction and motion of solitons in passively-mode-locked fiber lasers[J]. *Physical Review A*, 2011, **84** (5): 1688-1690.
- [2] FERMAN M, HARTL I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(7): 868-874.

- [3] SMIRNOV S, KOBTSEV S, KUKARIN S, *et al.* Three key regimes of single pulse generation per round trip of all-normal-dispersion fiber lasers mode-locked with nonlinear polarization rotation[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(24): 27447-27453.
- [4] YUN Lin, LIU Xue-ming, MAO Dong. Observation of dual-wavelength dissipative solitons in a figure-eight erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(19): 20992-20997.
- [5] MAO Dong, LIU Xue-ming, LU Hua. Observation of pulse trapping in a near-zero dispersion regime[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(13): 2619-2621.
- [6] ZENG Chao, LIU Xue-ming, YUN Lin. Bidirectional fiber soliton laser mode-locked by single-wall carbon nanotubes[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(16): 18937-18942.
- [7] SONG Yu-feng, LI Lei, ZHANG Han, *et al.* Vector multi-soliton operation and interaction in a graphene mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8): 10010-10018.
- [8] HE Xiao-ying, LIU Zhi-bo, WANG D N. Wavelength-tunable, passively mode-locked fiber laser based on graphene and chirped fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(12): 2394-2396.
- [9] CUI Yu-dong, LIU Xue-ming. Graphene and nanotube mode-locked fiber laser emitting dissipative and conventional solitons [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(16): 18969-18974.
- [10] DUAN Li-na, LIU Xue-ming, MAO Dong, *et al.* Experimental observation of dissipative soliton resonance in an anomalous-dispersion fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(1): 265-270.
- [11] MAO Dong, LIU Xue-ming, WANG Lei-ran, *et al.* Partially polarized wave-breaking-free dissipative soliton with superbroad spectrum in a mode-locked fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, **8**(2): 134-138.
- [12] WANG Lei-ran, LIU Xue-ming, GONG Yong-kang, *et al.* Observations of four types of pulses in a fiber laser with large net-normal dispersion[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(8): 7616-7624.
- [13] WANG Lei-ran, LIU Xue-ming, GONG Yong-kang, *et al.* Ultra-broadband high-energy pulse generation and evolution in a compact erbium-doped all-fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, **8**(5): 376-381.
- [14] ROZHIN A G, SAKAKIBARA Y, NAMIKI S, *et al.* Sub-200-fs pulsed erbium-doped fiber laser using a carbon nanotube-polyvinyl alcohol mode locker[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(5): 051118.
- [15] ZHANG Zu-xing, POPA D, WITTEW V J, *et al.* All-fiber nonlinearity- and dispersion-managed dissipative soliton nanotube mode-locked laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **107**(24): 868.
- [16] KUAN Pei-wen, LI Ke-feng, ZHANG Lei, *et al.* 0.5-GHz repetition rate fundamentally Tm-doped mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(14): 1525-1528.
- [17] VENEDIKTOV V Y, FILATOV Y V, SHALYMOV E V. Passive ring resonator micro-optical gyroscopes[J]. *Quantum Electronics*, 2016, **46**(5): 437-446.
- [18] MAMIDALA V, WOODWARD R I, YANG Y, *et al.* Graphene-based passively mode-locked bidirectional fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(4): 4539-4546.
- [19] KIEU K, MANSURIPUR M. All-fiber bidirectional passively mode-locked ring laser[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(1): 64-66.
- [20] OUYANG Chun-mei, SHUM P, WU Kan, *et al.* Bidirectional passively mode-locked soliton fiber laser with a four-port circulator[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(11): 2089-2091.
- [21] CUI Yu-dong, LIU Xue-ming. Graphene and nanotube mode-locked fiber laser emitting dissipative and conventional solitons[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(16): 18969-18974.
- [22] NISHIZAWA N, NOZAKI Y, ITOGA E, *et al.* Dispersion-managed, high-power, Er-doped ultrashort-pulse fiber laser using carbon-nanotube polyimide film[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 21874-21879.
- [23] KWON W S, LEE H, KIM J H, *et al.* Ultrashort stretched-pulse L-band laser using carbon-nanotube saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(6): 7779-7785.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61274121, 61574080), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20161521), the Distinguished Professor Project of Jiangsu (No. RK002STP14001), the Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (No. 2015-XCL-023), the Talents Projects in Nanjing University of Posts and Telecommunications (Nos. NY214002, NY215002)