

**滤波对8字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响**

石俊凯 王国名 黎尧 高书苑 刘立拓 周维虎

Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser

Shi Jun-Kai Wang Guo-Ming Li Yao Gao Shu-Yuan Liu Li-Tuo Zhou Wei-Hu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 064206 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182144

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182144>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

[基于增益光纤长度优化的双波长运转掺铒光纤锁模激光器](#)

Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser based on optimizing gain fiber length

物理学报. 2017, 74(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134203>

[利用啁啾脉冲光谱滤波和非线性偏振旋转技术实现高稳定性和开机自启动的全光纤掺Yb<sup>3+</sup>光纤锁模激光器](#)

Highly stable and self-started all-fiber Yb<sup>3+</sup> doped fiber laser mode-locked by chirped pulse spectral filtering and nonlinear polarization evolution

物理学报. 2016, 73(21): 214207 <https://doi.org/10.7498/aps.65.214207>

[高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器](#)

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser

物理学报. 2015, 72(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.64.064206>

[超长腔碳纳米管锁模多波长掺铒光纤激光器](#)

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes

物理学报. 2015, 72(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.204205>

[石墨烯被动锁模全正色散掺铒光纤激光器中的暗脉冲及其谐波](#)

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

物理学报. 2015, 72(19): 194205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.194205>

## 滤波对 8 字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响\*

石俊凯<sup>1)</sup> 王国名<sup>1)</sup> 黎尧<sup>1)</sup> 高书苑<sup>1)</sup> 刘立拓<sup>1)</sup> 周维虎<sup>1)2)†</sup>

1) (中国科学院光电研究院激光测量技术研究室, 北京 100094)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2018 年 12 月 5 日收到; 2019 年 1 月 21 日收到修改稿)

构建了基于损耗非对称非线性光学环境的 8 字腔掺铒光纤锁模激光器, 并讨论了腔内滤波带宽对腔内脉冲演化和激光器输出特性的影响. 在非线性光学环境中引入双向输出耦合器, 耦合器和传输光纤位置的不对称产生非互易性, 实现锁模运转. 利用自制的可调谐滤波器实验研究了滤波带宽对激光器的影响. 当滤波带宽为 2.1 nm 时, 腔内脉冲的演化过程受滤波和孤子效应的共同作用, 激光器顺时针和逆时针输出脉冲半高全宽分别为 583.7 fs 和 2.94 ps. 随着滤波带宽增大, 滤波的作用逐渐减弱, 激光器两路输出脉冲参数逐渐接近, 并接近傅里叶变换极限脉冲. 当滤波带宽较大时, 腔内脉冲的演化过程受增益谱和孤子效应的共同作用, 激光器顺时针和逆时针输出脉冲均为变换极限脉冲, 半高全宽约为 440 fs. 通过调节滤波器中心波长实现了对激光器输出脉冲光谱的连续调谐, 调节范围大于 30 nm.

**关键词:** 8 字腔锁模激光器, 损耗非对称, 非线性光学环境, 光谱滤波

**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Wd, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182144

## 1 引言

近年来, 被动锁模光纤激光器引起了大量关注<sup>[1-24]</sup>. 由于具有结构紧凑、稳定性高、成本低等优点, 该类激光器被广泛应用于光谱学、精密计量等领域.

目前常用的饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 可分为材料 SA 和基于光纤非线性效应的等效 SA. 材料 SA 主要包括半导体 SA<sup>[1,2]</sup>、碳纳米管<sup>[3,4]</sup>、石墨烯<sup>[5,6]</sup>、拓扑绝缘体<sup>[7,8]</sup>等. 材料 SA 具有自启动性能好、运转稳定、与保偏结构兼容等优点, 受到人们的青睐. 但是材料 SA 损伤阈值低, 材料性能会随着时间衰退, 而且较慢的响应速度会导致较大的相位噪声, 限制了激光器在精密测量领域的应用. 基于光纤非线性效应的等效 SA 主要包括

非线性偏振旋转机制<sup>[9,10]</sup>、Mamyshev 振荡器<sup>[11,12]</sup>和非线性光学环境 (nonlinear optical loop mirror, NOLM)<sup>[13-15]</sup>. 相比于材料 SA, 该类 SA 具有响应速度快、噪声低、损伤阈值高、性能稳定等优点. 其中 NOLM 可与保偏结构兼容, 是很好的选择. NOLM 锁模激光器通常需要一定的分束比, 利用不同光强在环境内沿相反方向传输积累的相位差启动锁模. 在 NOLM 锁模激光器中, 大分束比会加快相位差积累, 但同时也降低了调制深度. 随后人们在 NOLM 内引入增益, 构成非线性放大环镜<sup>[16-18]</sup>, 利用增益和传输光纤位置的不对称性产生非线性相移, 优化了锁模启动性能. 近年来人们又陆续报道了基于色散非对称<sup>[19,20]</sup>和损耗非对称<sup>[21]</sup> NOLM 的光纤锁模激光器. 此外在激光腔内引入移相器<sup>[22-24]</sup>可显著提高锁模自启动性能. 在 NOLM 锁模光纤激光器中, 滤波器可以滤除拉曼

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61475162, 61575105)、中国科学院前沿科学重点研究计划 (批准号: QYZDY-SSW-JSC008) 和中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (批准号: 181811KYSB20160029) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn

频移产生的长波成分, 限制脉冲演化的边界条件, 在锁模运转中起到重要作用. 但是滤波参数对 NOLM 光纤激光器锁模运转的影响很少报道.

本文首先在 NOLM 中引入双向输出耦合器, 形成损耗非对称 NOLM, 在此基础上构建了 8 字腔掺铒光纤锁模激光器, 实现了自启动单脉冲锁模运转. 利用自制的可调谐滤波器实验研究了滤波带宽对激光器腔内脉冲演化和输出特性的影响. 当滤波带宽较小时, 腔内脉冲的演化过程受到滤波和孤子效应的共同作用, 激光器两路输出脉冲参数差别较大. 当滤波带宽较大时, 腔内脉冲的演化过程受增益谱和孤子效应的共同作用, 激光器两路输出脉冲参数趋于相同. 此外, 通过调节滤波器中心波长实现了对激光器输出脉冲光谱的连续调谐.

## 2 实验装置

激光器实验装置如图 1 所示. 采用分束比为 50 : 50 的  $2 \times 2$  保偏光纤光学耦合器 (optical coupler,  $OC_1$ ) 作为激光器的枢纽, 将  $OC_1$  右侧的两根尾纤连接, 构成非线性光纤环境. 在光纤环路中引入分束比为 10 : 90 的  $OC_2$  作为双向输出耦合器, 将光纤环境中沿相反方向传输的两束激光 90% 的能量导出腔外作为激光器顺时针 (clockwise, CW) 和逆时针 (counter-clockwise, CCW) 输出. 在环境中接入长为 65 m 的保偏无源光纤 (passive fiber, PF), 其群速度色散为  $-0.022 \text{ ps}^2/\text{m}$ . 利用  $OC_2$  产生的损耗和 PF 在光纤环境中位置的非对称性产生非线性相移. 将  $OC_1$  左侧的两根尾纤连接, 并依次接入保偏相关光学隔离器 (optical isolator, OI)、保偏增益光纤和可调谐带通滤波器 (tunable bandpass filter, TBPF). 增益光纤采用长为 2 m 的保偏掺铒光纤 (Er-doped fiber, EDF), 群速度色散为  $-0.02 \text{ ps}^2/\text{m}$ . 抽运源采用两个尾纤耦合输出的单模激光二极管 (laser diode, LD), 中心波长均为 976 nm. 激光器采用双向抽运方式, 抽运光通过两个保偏尾纤波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 耦合进增益光纤, 实现激光增益. 隔离器确保左侧光纤环内激光的单向运转. 滤波器采用自制的可调谐带通滤波器, 采用保偏尾纤导入导出, 可实现滤波带宽和中心波长的独立连续调谐. 激光器腔内净色散约为  $-1.65 \text{ ps}^2$ . 实验中采用功率计 (Thorlabs, PM100D) 测量

激光功率, 由光谱仪 (YOKOGAWA, AQ6370D) 记录光谱; 脉冲宽度由 APE 公司的自相关仪 (Pulse Check) 测得; 锁模脉冲序列和频谱由数字示波器 (KEYSIGHT, DSO9245A)、频谱分析仪 (KEYSIGHT, N9010A) 结合光电二极管 (Newport, Model 1811) 进行监测.

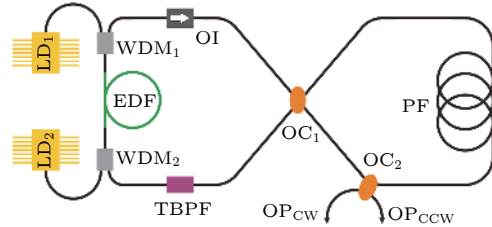


图 1 实验装置图 (LD, 激光二极管; WDM, 波分复用器; EDF, 掺铒光纤; OC, 光学耦合器; OI, 光学隔离器; TBPF, 可调谐带通滤波器; PF, 被动光纤;  $OP_{CW}/OP_{CCW}$ , 顺时针/逆时针输出)

Fig. 1. Experimental setup. LD, laser diode; WDM, wave length division multiplexer; EDF, Er-doped fiber; OC, optical coupler; OI, optical isolator; TBPF, tunable bandpass filter; PF, passive fiber;  $OP_{CW}/OP_{CCW}$ , clockwise/counter-clockwise output.

为了检测自制滤波器的滤波性能, 按图 1 所示的结构构建不含滤波器的 8 字腔激光器, 以低功率抽运下输出的自发辐射荧光作为测试光, 其光谱如图 2(a) 所示. 将滤波带宽设定在最小值 1.4 nm, 通过调节可得到不同波长的滤波光谱, 如图 2(b) 所示, 波长调节范围为 1532—1569.7 nm, 且不同波长的光谱均呈现相同的光谱形状. 将中心波长设定为 1556 nm, 图 2(c) 为经过不同滤波带宽输出的光谱. 由于测试光谱为非平顶光谱, 当滤波带宽较大时, 滤波光谱的 3 dB 谱宽无法准确表示滤波器的滤波带宽 (如图 2(d) 所示). 因此, 在本文中采用 10 dB 谱宽标定滤波器的滤波带宽. 图 2(c) 中展示的滤波带宽调节范围为 1.4—14.3 nm. 本文展示的波长和带宽调节范围受限于测试光谱. 事实上, 该滤波器可实现更大的滤波带宽和中心波长调节范围.

## 3 实验结果与分析

将滤波器按图 1 所示位置接入激光器, 滤波带宽设定为 2.8 nm, 中心波长设定为 1556 nm. 当同向和对向抽运功率分别设定为 280 mW 和 400 mW 时, 激光器实现了自启动单脉冲锁模运转. CW 和

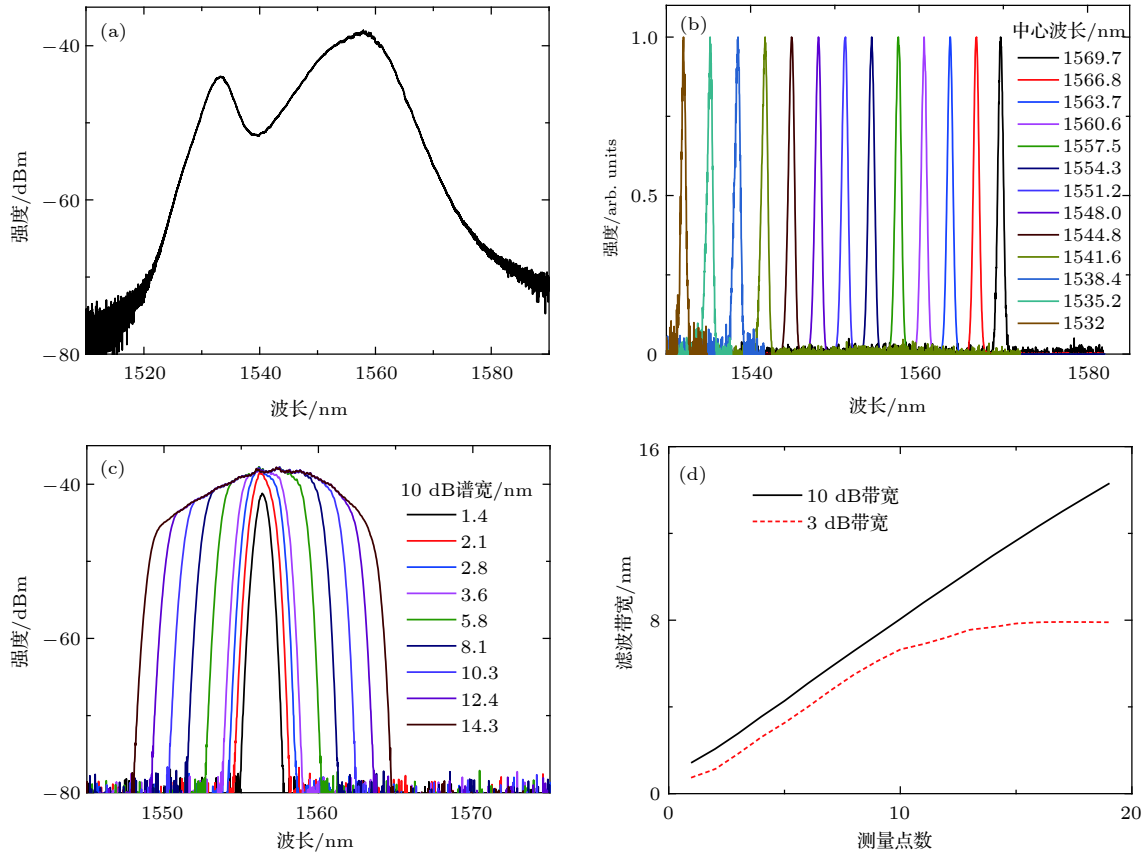


图 2 滤波性能测试结果 (a) 自发辐射光谱; (b) 滤波带宽设定为 1.4 nm 条件下输出可调谐滤波光谱; (c) 滤波中心波长设定为 1556 nm 条件下输出带宽调谐滤波光谱; (d) 带宽调谐滤波光谱 3 dB 带宽和 10 dB 带宽的对比

Fig. 2. Test results of the spectral filtering performance: (a) Spontaneous emission spectrum; (b) the central wavelength tunable spectra with fixed bandwidth of 1.4 nm; (c) bandwidth tunable spectra with fixed central wavelength of 1556 nm; (d) comparison of 3 dB bandwidth and 10 dB bandwidth of bandwidth tunable spectra.

CCW 输出功率分别为 8.4 mW 和 8.6 mW, CW 输出功率略低于 CCW 输出, 这是由 NOLM 中的熔接损耗和传输损耗造成的. 由于耦合输出和滤波器引入了较大的腔内损耗, 激光器光-光转换效率仅为 2.5%. 激光器锁模输出的脉冲特性如图 3 所示.

图 3(a) 为 CW 和 CCW 输出脉冲的光谱, 插图为对数坐标下的光谱. CW 和 CCW 光谱的 3 dB 谱宽分别为 8.9 nm 和 2.1 nm. CW 输出光谱表现出明显的不对称性, 长波区域的衰减速度明显低于短波区域. 图 3(b) 为 CW 和 CCW 输出脉冲的自相关曲线, 其半高全宽 (full width half maximum, FWHM) 分别为 815.7 fs 和 3.08 ps. 假设脉冲为高斯型脉冲, 对应的脉冲 FWHMs 为 576.9 fs 和 2.18 ps. 由于耦合输出的位置与  $OC_1$  十分接近, 因此可以近似地将 CCW 和 CW 输出脉冲当作 NOLM 的输入和输出脉冲. 脉冲经过  $OC_1$  耦合进 NOLM 后进入负色散传输光纤, 在孤子效应的作

用下脉宽缩短, 同时由于自相位调制的作用光谱得到展宽. 光谱展宽过程中, 在拉曼效应的作用下光谱呈现出非对称性<sup>[25]</sup>. 当脉冲耦合出 NOLM 后, 经过滤波, 脉冲在频域和时域迅速恢复到初始状态, 形成自洽. 图 3(c) 为激光器 CW 和 CCW 输出的脉冲序列, 脉冲间距均为 365.8 ns. 图 3(d) 为一次谐波射频频谱, 插图为 0—50 MHz 范围的射频频谱. 激光器 CW 和 CCW 输出脉冲的重复频率为 2.734 MHz, 对应的脉冲能量分别为 3.07 nJ 和 3.15 nJ. 激光器输出的信噪比约为 60 dB. 以上测量结果表明激光器实现了稳定的单脉冲锁模运转.

在激光器工作在锁模状态条件下, 通过手动调节滤波器的滤波带宽, 并记录激光器输出特性, 如图 4 所示. 图 4(a) 为 CW 和 CCW 输出脉冲的时域 FWHMs 和 3 dB 谱宽随滤波带宽的变化曲线, 图 4(b) 为对应的时间带宽积随滤波带宽的变化曲线, 图 4(c) 和图 4(d) 分别为不同滤波带宽下 CW 和 CCW 输出脉冲的光谱和自相关曲线 (内插

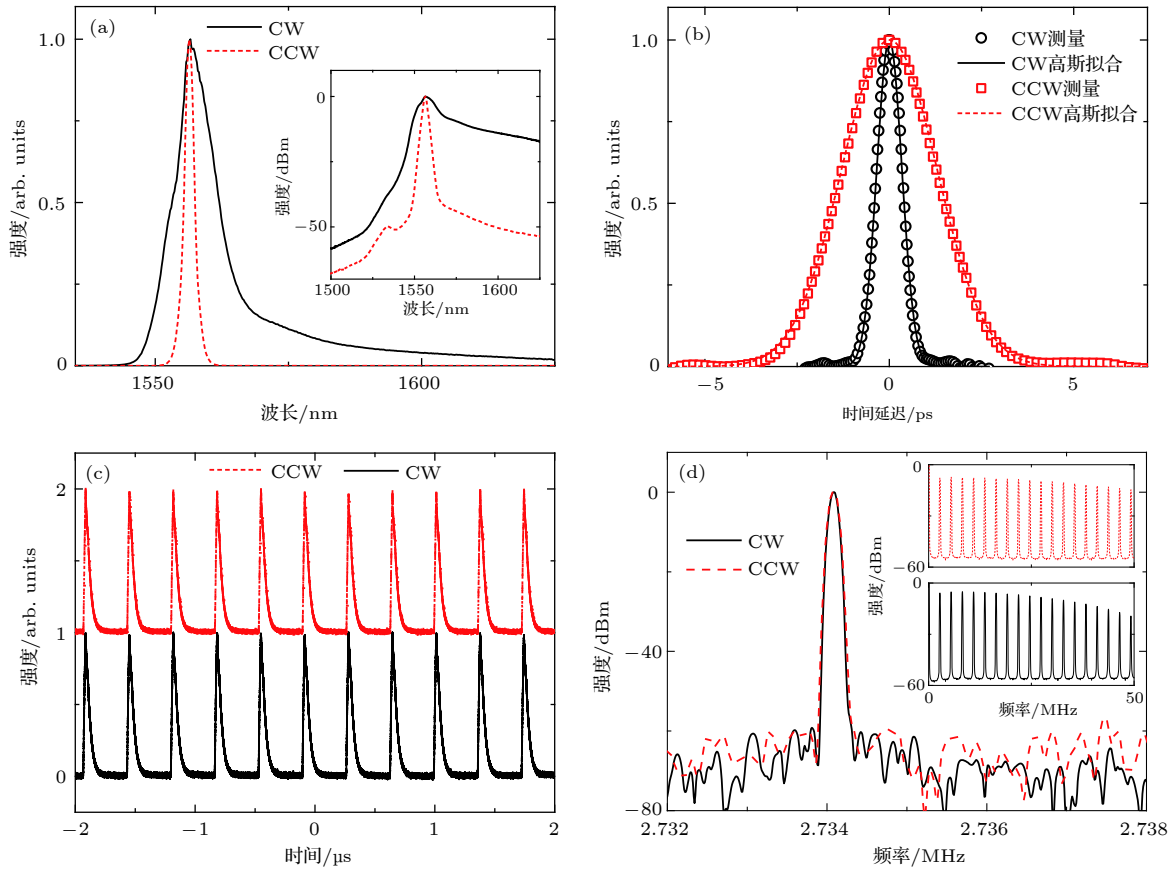


图 3 激光器顺时针和逆时针输出特性 (a) 线性坐标和对数坐标(插图)下的光谱; (b) 自相关曲线; (c) 脉冲序列; (d) 一次谐波射频谱和 0—50 MHz 范围的射频谱(插图)

Fig. 3. Laser CW and CCW output characteristics: (a) Spectra on linear scale and log scale (inset); (b) autocorrelation traces; (c) pulse train; (d) radio frequency spectra around repetition rate and in wider range (inset).

图). 当滤波带宽为 2.1 nm 时, 激光器 CW 和 CCW 输出脉冲 FWHMs 分别为 583.7 fs 和 2.94 ps, 3 dB 谱宽分别为 10.1 nm 和 1.8 nm. 两路输出参数差别较大, 这是由于窄带滤波器对光谱的滤波作用造成的. 滤波带宽增加到 5.8 nm, CCW 输出谱宽随之增加到 4 nm, 脉冲宽度迅速下降到 622.1 fs, CW 输出谱宽则降低到 7 nm, 脉宽降低到 454.2 fs. 两路输出脉冲的参数迅速接近, 滤波对腔内脉冲演化过程的影响逐渐减弱. 在这一过程中, 两路输出脉冲的时间带宽积迅速下降, 输出脉冲逐渐接近变换极限脉冲. 将滤波带宽逐渐增加到 14.3 nm, CW 和 CCW 输出脉宽均缓慢下降并趋近于同一常数, 约为 440 fs; CW 和 CCW 输出谱宽均呈现缓慢上升趋势, 且 CW 输出光谱比 CCW 输出光谱宽约 2.5 nm, 这是由于脉冲在光纤环路传输过程中, 自相位调制作用展宽了光谱. 此时, 腔内脉冲谱宽取决于增益谱, 且由于增益谱的影响, 输出光谱向长波方向漂移. 在孤子效应的作用下, 两路

输出脉冲的时间带宽积均维持在较低水平. 滤波器仅起到滤除拉曼频移产生的长波成分的作用, 不再影响腔内脉冲的演化过程. CCW 输出脉冲的时间带宽积明显小于变换极限高斯脉冲的时间带宽积 0.441, 这是因为此时 CCW 输出脉冲并非标准的高斯脉冲, 如图 4(d) 内插图所示, 脉冲自相关曲线出现明显的基底. 当滤波带宽小于 2.1 nm 时, 由于滤波器引入的损耗过大, 激光器无法维持锁模运转. 若去掉滤波器, 激光器同样无法实现锁模运转.

此外在锁模状态下, 通过调节滤波器中心波长可以实现锁模激光器输出波长的连续调节. 滤波带宽设定为 2.8 nm, 滤波中心波长从 1535 nm 调节到 1568 nm, 激光器均可维持稳定的锁模运转. CW 和 CCW 输出不同中心波长的光谱如图 5 所示, 波长调节范围大于 30 nm. 该调节范围受限于增益谱和腔内损耗, 通过提高抽运功率可以扩大光谱调节范围.

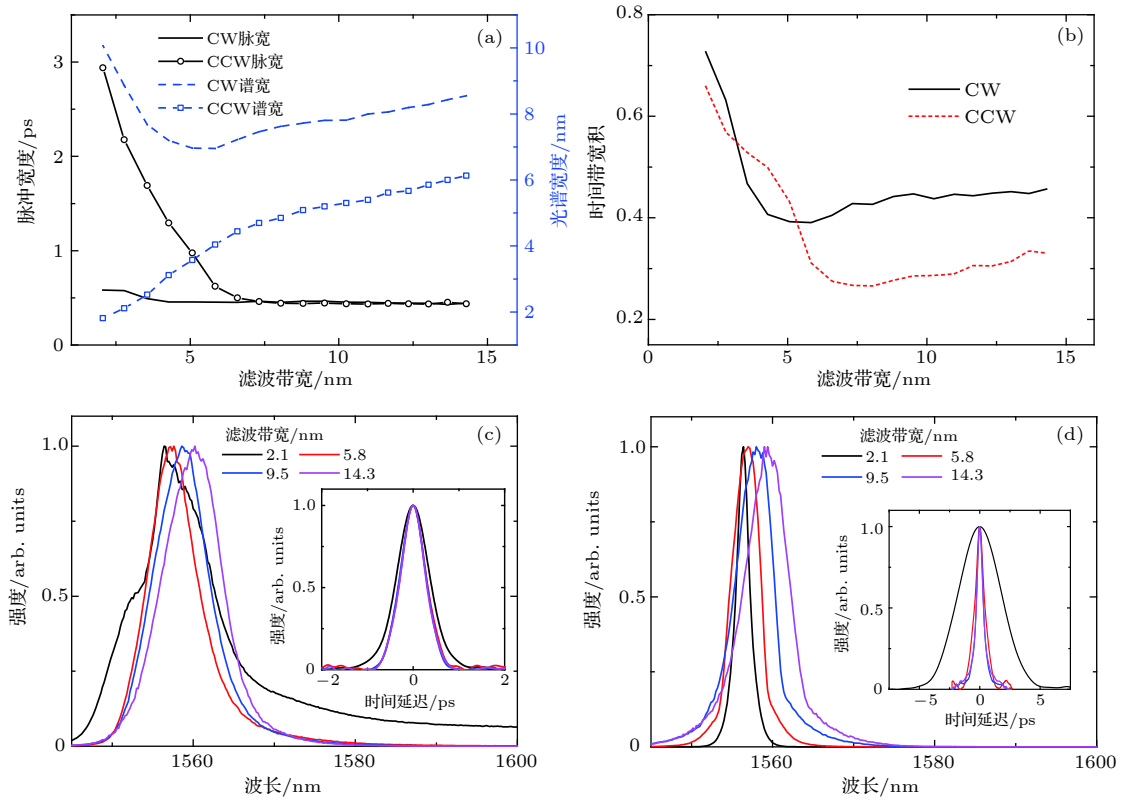


图 4 滤波带宽对激光器输出的 (a) 脉宽、谱宽和 (b) 时间带宽积的影响; 不同滤波带宽条件下 (c) CW 和 (d) CCW 输出的光谱与自相关曲线 (插图)

Fig. 4. Impact of filtering bandwidth on (a) pulse durations, spectral bandwidths and (b) time-bandwidth products; spectra and autocorrelation traces (inset) of (c) CW and (d) CCW output pulses with different filtering bandwidth.

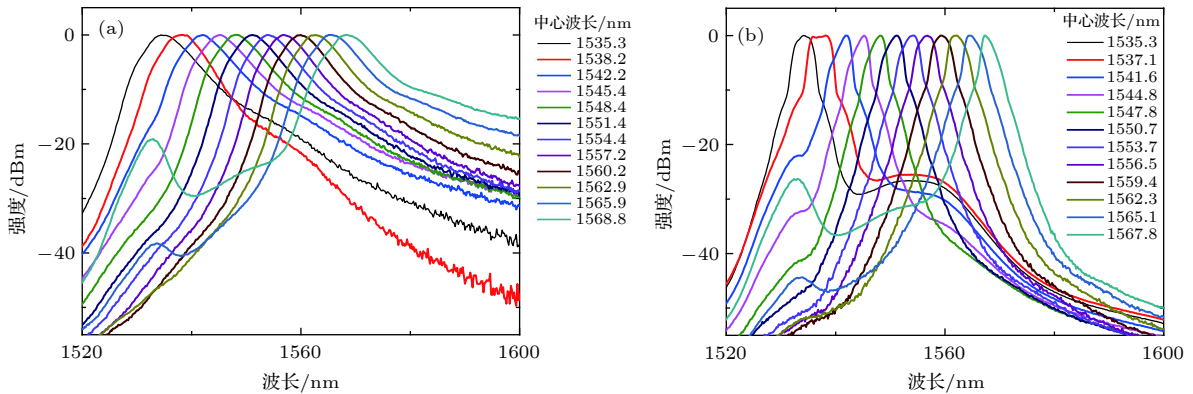


图 5 CW 和 CCW 输出的可调谐光谱 (a) CW; (b) CCW

Fig. 5. Output tunable spectra of CW and CCW: (a) CW; (b) CCW.

## 4 结 论

本文构建了基于损耗非对称 NOLM 的 8 字腔掺铒光纤锁模激光器, 激光器重频为 2.734 MHz, 两路输出脉冲能量均大于 3 nJ. 利用自制的可调谐滤波器实验研究了滤波带宽对激光器腔内脉冲演化和输出特性的影响. 当滤波带宽较小时, 腔内

脉冲的演化过程受滤波和孤子效应的共同作用, 激光器 CW 和 CCW 输出脉冲 FWHMs 差别较大, 分别为 583.7 fs 和 2.94 ps. 随着滤波带宽增大, 腔内脉冲的演化过程中, 滤波的作用逐渐减弱, 增益谱的作用逐渐增强. 激光器两路输出脉冲参数逐渐接近并趋于相同, 同时输出脉冲逐渐接近傅里叶变换极限脉冲. 当滤波带宽较大时, 激光器 CW 和 CCW 输出脉冲为变换极限脉冲, FWHM 均为

440 fs. 通过调节滤波器中心波长还实现了对激光器输出脉冲光谱的连续调谐, 调谐范围大于 30 nm. 该锁模激光器实现了输出脉宽、谱宽和波长的连续调谐, 可应用于不同的领域.

## 参考文献

- [1] Shi J K, Ji R Y, Li Y, Liu Y, Zhou W H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 134203 (in Chinese) [石俊凯, 纪荣祜, 黎尧, 刘娅, 周维虎 2017 物理学报 **66** 134203]
- [2] Zhu Z W, Liu Y, Zhang W C, Luo D P, Wang C, Zhou L, Deng Z J, Li W X 2018 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **30** 1139
- [3] Wang S S, Pan Y Z, Gao R X, Zhu X F, Su X H, Qu S L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024209 (in Chinese) [王莎莎, 潘玉寨, 高仁喜, 祝秀芬, 苏晓慧, 曲士良 2013 物理学报 **62** 024209]
- [4] Khagai A, Melkumov M, Firstov S, Riumkin K, Gladush Y, Alyshev S, Lobanov A, Khopin V, Afanasiev F, Nasibulin A, Dianov E 2018 *Opt. Express* **26** 23911
- [5] Zhu G W, Zhu X S, Wang F Q, Xu S, Li Y, Guo X L, Balakrishnan K, Norwood R A, Peyghambarian N 2016 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **28** 7
- [6] Boguslawski J, Sotor J, Sobon G, Kozinski R, Librant K, Aksienionek M, Lipinska L, Abramski K M 2015 *Photon. Res.* **3** 119
- [7] Li J, Zhao Y F, Chen Q Y, Niu K D, Sun R Y, Zhang H N 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1506707
- [8] Wang J T, Jiang Z K, Chen H, Li J R, Yin J D, Wang J Z, He T C, Yan P G, Ruan S C 2018 *Photon. Res.* **6** 535
- [9] Zhang D P, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **61** 044206 (in Chinese) [张大鹏, 胡明列, 谢辰, 柴路, 王清月 2011 物理学报 **61** 044206]
- [10] Liu H, Gong M L, Cao S Y, Lin B K, Fang Z J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114210 (in Chinese) [刘欢, 巩马理, 曹士英, 林百科, 方占军 2015 物理学报 **64** 114210]
- [11] Liu Z W, Ziegler Z M, Wright L G, Wise F W 2017 *Optica* **4** 649
- [12] Sidorenko P, Fu W, Wright L G, Olivier M, Wise F W 2018 *Opt. Lett.* **43** 2672
- [13] Doran N J, Wood D 1988 *Opt. Lett.* **13** 56
- [14] Zhao L M, Bartnik A C, Tai Q Q, Wise F W 2013 *Opt. Lett.* **38** 1942
- [15] Szczepanek J, Kardas T M, Michalska M, Radzewicz C, Stepanenko Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 3500
- [16] Fermann M E, Haberl F, Hofer M, Hochreiter H 1990 *Opt. Lett.* **15** 752
- [17] Krzempek K, Sotor J, Abramski K 2016 *Opt. Lett.* **41** 4995
- [18] Yu Y, Teng H, Wang H B, Wang L N, Zhu J F, Fang S B, Chang G Q, Wang J L, Wei Z Y 2018 *Opt. Express* **26** 10428
- [19] Seong N H, Kim D Y 2002 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **14** 459
- [20] Hao Q, Chen F H, Yang K W, Zhu X Y, Zhang Q S, Zeng H P 2016 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **28** 87
- [21] Shi J K, Li Y, Gao S Y, Pan Y L, Wang G M, Ji R Y, Zhou W H 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 121404
- [22] Jiang T X, Cui Y F, Lu P, Li C, Wang A M, Zhang Z G 2016 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **28** 1786
- [23] Hänsel W, Hoogland H, Giunta M, Schmid S, Steinmetz T, Doubek R, Mayer P, Dobner S, Cleff C, Fischer M, Holzwarth R 2017 *Appl. Phys. B* **123** 40
- [24] Liu W, Shi H S, Cui J H, Xie C, Song Y J, Wang C Y, Hu M L 2018 *Opt. Lett.* **43** 2848
- [25] Dianov E M, Karasik A Y, Mamyshev P V, Prokhorov A M, Serkin V N, Stelmakh M F, Fomichev A A 1985 *JETP Lett.* **41** 294

# Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser<sup>\*</sup>

Shi Jun-Kai<sup>1)</sup> Wang Guo-Ming<sup>1)</sup> Li Yao<sup>1)</sup> Gao Shu-Yuan<sup>1)</sup> Liu Li-Tuo<sup>1)</sup>  
Zhou Wei-Hu<sup>1)2)†</sup>

1) (*Laboratory of Laser Measurement Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 5 December 2018; revised manuscript received 21 January 2019)

## Abstract

Over the last decades, passive mode-locked fiber laser has received considerable attention because of ultrashort pulse, compactness, and low cost. As a saturable absorber, nonlinear optical loop mirror (NOLM) has shown the advantages of high damage threshold, possibility of all-PM fiber implementation, short response time and therefore potentially low intrinsic noise. Spectral filtering plays an important role in NOLM mode locked fiber laser, but the influence of filtering parameters on mode locking operation is rarely reported. In this paper, the influence of filtering bandwidth on mode locking operation and on output pulse characteristics are experimentally investigated. A  $2 \times 2$  optical coupler with a splitting ratio of 10 : 90 is introduced at one end of fiber loop to form a loss-imbalanced NOLM, and extracts 90% of intracavity pulse energy as outputs. With this architecture, an all polarization-maintaining figure-8 Er-doped fiber ultrafast laser is achieved. A home-made bandwidth and wavelength tunable bandpass filter is utilized in the cavity, and the filtering bandwidth is defined by 10 dB bandwidth. The clockwise and counter-clockwise mode locked output power are 8.4 mW and 8.6 mW, respectively, with a repetition rate of 2.734 MHz. With a spectral bandwidth of 2.1 nm, the intracavity pulse is shaped by spectral filtering and soliton effect. The 3 dB bandwidth of the clockwise and counter-clockwise mode locked output pulse are 10.1 nm and 1.8 nm, and the values of corresponding full width at half maximum (FWHM) of the direct outputs are 583.7 fs and 2.94 ps, respectively. As the filtering bandwidth increases, the role of filter in spectral shaping weakens, and the parameters of two output pulses become close. When spectral bandwidth is larger than 7.3 nm, the intracavity pulse is shaped by gain spectrum and soliton effect. Both of the clockwise and counter-clockwise output pulses become the transform-limited pulses with almost the same FWHMs of 440 fs. Besides, the wavelength of the figure-8 fiber laser can be adjusted in a range larger than 30 nm by modulating the wavelength of the filter. The tunable mode-locked fiber laser has great potential applications in various application fields.

**Keywords:** figure-eight mode locked laser, loss-imbalance, nonlinear optical loop mirror, spectral filtering

**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Wd, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182144

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475162, 61575105), the Key Research Project of Bureau of Frontier Sciences and Education, Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDY-SSW-JSC008), and the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 181811KYSB20160029).

† Corresponding author. E-mail: [zhouweihu@aoe.ac.cn](mailto:zhouweihu@aoe.ac.cn)