

全保偏被动同步的双色锁模光纤激光器的实验研究

江云峰¹, 武佳美¹, 郝强¹, 黄坤^{1*}, 曾和平^{1,2,3}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;

³济南量子技术研究院, 山东 济南 250101

摘要 设计并搭建了被动全光同步的全保偏光纤激光系统,该系统能够长时稳定输出时域精确同步的双色超快脉冲。被动同步系统包含两台基于非线性放大环形镜锁模的掺铒与掺镱全保偏光纤激光振荡器,采用主从注入式整体结构,借助注入脉冲在从激光谐振腔中引入的非对易非线性相移,获得了自适应同步的锁模脉冲输出。通过优化主激光注入脉冲能量和从激光器腔内滤波带宽等实验参数,获得了长达 26 mm 的腔长失配容忍度。该脉冲同步系统具有结构简单、即插即用、稳定性好、保偏输出等优点。

关键词 锁模激光器; 光纤激光器; 超快非线性光学

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0936001

Experimental Study on All-Polarization-Maintaining Passive Synchronization for Dual-Color Mode-Locked Fiber Lasers

Jiang Yunfeng¹, Wu Jiamei¹, Hao Qiang¹, Huang Kun^{1*}, Zeng Heping^{1,2,3}

¹School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

³Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan, Shandong 250101, China

Abstract We have designed and constructed a synchronized fiber laser system in the all-optical and passive way, which enables to deliver dual-color ultrafast pulses with long-term stability and high timing precision. This synchronization system consisting of two Er- and Yb-doped fiber lasers mode-locked by nonlinear amplifying loop mirrors adopts a master-slave configuration. The injection pulse induces a non-reciprocal nonlinear phase shift within the laser resonator cavity, and thus an adaptively synchronous mode-locking output is realized. After optimizing the experimental parameters including pulse energy of master injection and filter bandwidth within laser resonator cavity, we achieved a 26 mm tolerance range of cavity-length mismatch. The pulse synchronization system here favors advantages such as simple structure, plug and play, good stability, and polarization-maintaining output.

Key words mode-locked lasers; fiber lasers; ultrafast nonlinear optics

OCIS codes 140.4050; 140.3510; 190.7110

超快光学脉冲的精确同步在众多现代科学与技术领域有着广泛应用,如相干拉曼显微成像、泵浦-探测超快光谱、超短脉冲相干合成、非线性光参量变换、粒子同步加速以及高精度时间分发等^[1]。通常,脉冲同步技术可以通过电子学主动反馈技术实现,借助高速锁相环^[2]或平衡光学互相关器^[3],已能达

到阿秒精度的时间抖动。另一种可行之道是全光被动同步技术^[4-5],其利用非线性交叉相位调制效应来获得高精度同步所需的宽带反馈,所形成的自适应锁定机制避免了复杂的模拟电路控制设计,有利于提高同步系统的集成度与便捷性。这种技术在光纤激光器中尤为适用,得益于光纤的波导结构,束缚光

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-02-28; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407100)、国家自然科学基金(11434005, 11504235, 11704253)、上海市科技创新行动计划(18JC1412000)

* E-mail: khuang@usst.edu.cn

场能够获得更高的光场强度,且能突破空间光束瑞利长度的限制,因此光场的强非线性相互作用距离更长。当前报道的被动同步超快光纤激光器主要利用非线性偏振旋转效应^[6-7]或可饱和吸收体^[8-9]实现锁模。然而,受限于同步锁模机制,上述同步系统的激光腔体主要由非保偏光纤与相关器件构成,为了获得稳定的同步性能,通常需要对注入脉冲偏振状态和腔内偏振演化进行精细调节,因而系统易受温度变化、机械振动、声音扰动等运行环境的干扰。最近,本课题组利用光纤非线性放大环形镜锁模机制,实现了全保偏被动同步的超快光纤激光系统,获得了 800 μm 的腔长失配容忍度,其具有超过 12 h 的长时稳定性^[10]。本文通过优化主激光注入脉冲能量和从激光器腔内滤波带宽等实验参数,将腔长失配容忍度提升到 26 mm,为同步双色超快光源在室外环境下更广泛的应用提供了支撑。

图 1 展示了全光被动同步双色超快激光系统的实验装置图,以掺铒光纤激光器(EDFL)作为主激光器,以掺镱光纤激光器(YDFL)作为从激光器,涉及的光纤与相关器件均为保偏结构,并采用非线性放大环形镜锁模机制获得保偏超快脉冲输出^[11]。主从激光器中都采用了相移器(PS),能够在 Sagnac 干涉环中

提供 $\pi/2$ 的非对易线性相位差,从而显著降低光纤激光器的锁模阈值[其中泵浦光由激光二极管(LD)提供],且能实现自启动锁模,锁模脉冲的重复频率为 15.73 MHz 左右。EDFL 的线性端以窄带光纤布拉格光栅(FBG)作为滤波反射镜,脉冲由光纤分束器(OC)输出,中心波长为 1549.8 nm,光谱宽度为 0.8 nm,对应的脉冲宽度为 5.2 ps。主激光器输出脉冲先经过单模掺铒光纤放大器(EDFA),随后通过光纤波分复用器(WDM)注入从激光腔,其中光纤隔离器(ISO)用于防止后向传输光对主激光器以及整个光路系统产生不良影响。此时,顺时针运行的从激光脉冲与注入脉冲同向运行,获得显著的非线性相移,从而实现从激光器的高速全光调制,利用光电探测器将主从激光器的输出脉冲转换为电信号后,将其分别接入示波器的通道 1(CH1)和通道 2(CH2)端口,最终可以在示波器上观察到稳定的同步脉冲序列,如图 1(d)所示。值得注意的是,从激光器中包含一对准直器(Col),通过改变它们之间的距离能够精细调节激光器的重复频率,利用频谱分析仪能够将主从激光器的重复频率设定为大致相同的数值。主从激光器的同步无需任何偏振调节,通过简单的主脉冲注入即能实现自启动的被动同步效果。

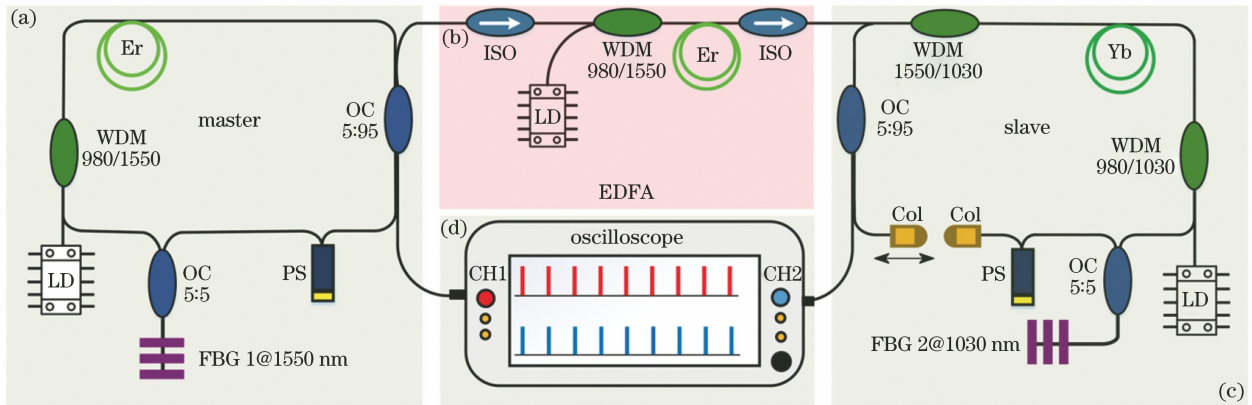


图 1 基于全保偏构架的全光被动同步双色超快激光系统。(a)以掺铒光纤激光器作为主激光器;(b)掺铒光纤放大器;(c)以掺镱光纤激光器作为从激光器;(d)同步双色脉冲

Fig. 1 All-optical passive synchronization system for dual-color ultrafast lasers in all-polarization-maintaining architecture. (a) Er-doped fiber laser as master; (b) Er-doped fiber amplifier; (c) Yb-doped fiber laser as slave; (d) synchronized dual-color pulses

随后,对被动同步系统作进行进一步优化。显然,更高的注入脉冲能量能够引起更显著的非线性效应,从而获得更大范围的被动锁定区间,对提高同步稳定性具有重要作用。如图 2(a)所示,腔长失配容忍度随着注入脉冲能量的增加而线性增加,在最大平均功率处,注入脉冲的能量为 1.3 nJ,对应的峰值功率为 0.26 kW,所能获得的腔长锁定范围达到

了 26 mm,相对于此前报道结果^[6-9]提高了至少一个量级。此外,实验还发现,影响锁定系统捕获范围的另一个因素是从激光器中 FBG 的带宽。为此,本文尝试了具有 0.1,0.2,0.8,3.0,5.0 nm 不同反射带宽的 FBG,得到图 2(b)所示的实验结果。由此可见,随着 FBG 带宽的增加,同步系统的腔长失配容忍度也增加。在同步状态下,从激光器中心波长会

随腔长的调谐而改变,因此,更大的 FBG 带宽意味着能够容忍更大的腔长失配量。此外,图 2(c)展示了同步系统长达 12 h 的被动锁定性能,其中 f_{fr} 为激光器的重复频率。在 10 s 的取样时间下,相对重复频率抖动的标准方差为 0.03 Hz,对应中心重复频率的相对误差为 1.9×10^{-9} 。

最后,研究了同步状态下主从激光器的时频域特性随腔长失配的变化。图 3(a)中的虚线和圆点分别表示在无注入和有注入情况下,主从激光器重复频率受从激光器腔长调谐的影响。可以看出,当

从激光器的重复频率逐渐靠近 15.73 MHz 时,经过短暂的调 Q 锁模后系统即进入稳定的同步锁模状态,此时主从激光器的重复频率相同。当从激光器腔长增大到超出同步系统的锁定范围时,同步系统失去锁定。图 3(b)给出了同步锁定区间内腔长调谐引起的从激光器中心波长移动。从激光器如果需保持与注入脉冲一致的恒定重复频率,其工作波长必然发生频移,从而可通过群速度色散来补偿腔长变化。此外,通过非线性和频方式测定双色同步脉冲的相对时间抖动约为 30 fs^[10]。

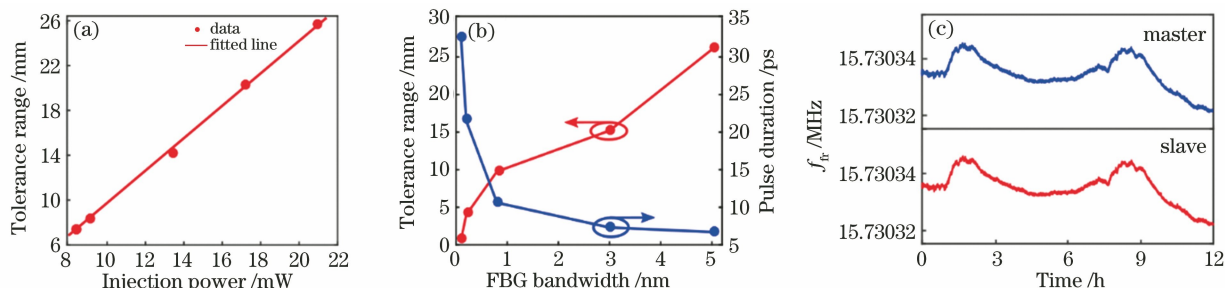


图 2 同步系统的优化及长时稳定性。(a)腔长失配容忍度随注入功率的变化;(b)从激光器 FBG 带宽对腔长失配容忍度与脉冲脉宽的影响;(c)同步系统的长时稳定性

Fig. 2 Optimization and long-term stability of synchronization systems. (a) Tolerance range of cavity-length mismatch versus injection power; (b) dependence of tolerance range of cavity-length mismatch and pulse duration on FBG bandwidth in slave laser; (c) long-term stability for synchronization system

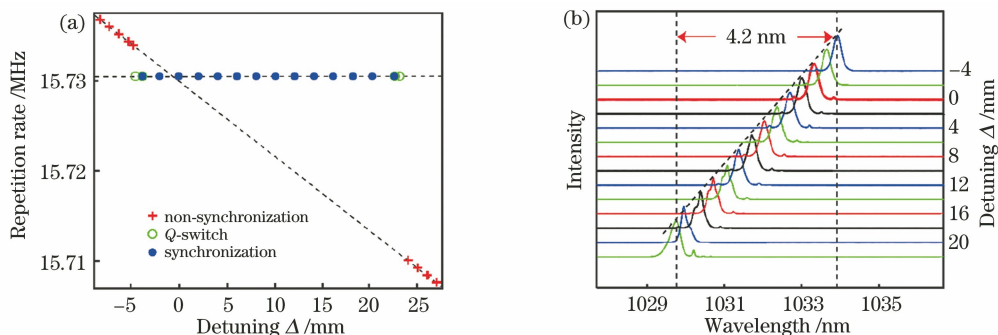


图 3 同步系统的重复频率与光谱变化。(a)主从激光器重复频率随腔长失配的变化;(b)从激光器光谱与腔长失配的关系

Fig. 3 Repetition rates and spectral variation of synchronization systems. (a) Repetition rates of master and slave lasers versus cavity-length mismatch; (b) dependence of optical spectra of slave laser on cavity-length mismatch

综上所述,研究了基于非线性放大环镜的新型同步锁模机制,展示了全保偏光纤结构锁模激光器的被动同步。搭建的同步系统兼具大锁定容忍度和低相对时间抖动,能够为中红外产生、泵浦-探测实验、相干拉曼光谱等提供长时稳定的高精度双色同步脉冲。

参 考 文 献

[1] Kim J, Kärtner F X. Attosecond-precision ultrafast photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2010, 4

(3): 432-456.

[2] Shelton R K, Foreman S M, Ma L S, et al. Subfemtosecond timing jitter between two independent, actively synchronized, mode-locked lasers[J]. Optics Letters, 2002, 27(5): 312-314.
 [3] Tian H C, Song Y J, Yu J H, et al. Optical-optical synchronization between two independent femtosecond Yb-fiber lasers with 10-20 instability in 105 s[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-7.
 [4] Furst C, Leitenstorfer A, Laubereau A. Mechanism for self-synchronization of femtosecond pulses in a two-color Ti: sapphire laser [J]. IEEE Journal of

- Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 473-479.
- [5] Wei Z, Kaboyashi Y, Torizuka K. Passive synchronization between femtosecond Ti: sapphire and Cr: forsterite lasers [J]. Applied Physics B, 2002, 74(S1): s171-s176.
- [6] Zhou C, Cai Y, Ren L, et al. Passive synchronization of femtosecond Er- and Yb-fiber lasers by injection locking[J]. Applied Physics B, 2009, 97(2): 445-449.
- [7] Huang K, Gu X R, Pan H F, et al. Synchronized fiber lasers for efficient coincidence single-photon frequency upconversion[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(2): 562-566.
- [8] Rusu M, Herda R, Okhotnikov O G. Passively synchronized erbium (1550-nm) and ytterbium (1040-nm) mode-locked fiber lasers sharing a cavity [J]. Optics Letters, 2004, 29(19): 2246-2248.
- [9] Zhang M, Kelleher E J R, Pozharov A S, et al. Passive synchronization of all-fiber lasers through a common saturable absorber [J]. Optics Letters, 2011, 36(20): 3984-3986.
- [10] Huang K, Zeng J, Gan J W, et al. Passive all-optical synchronization for polarization-maintaining mode-locked fiber lasers [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 32184-32193.
- [11] Yang S, Hao Q, Zeng H P. Repetition rate precision lock of nonlinear amplifying loop mirror passively mode-locked fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0801007.
杨松, 郝强, 曾和平. 非线性放大环形镜被动锁模光纤激光器重复频率精确锁定研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0801007.