

全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成研究

杨保来 王小林 周 朴 冀 翔 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出了全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成方案,在自制的光纤放大器基础上,实现了四路光纤激光的全光纤被动锁相相干合成。对合成的开环闭环功率、光谱、远场光斑图样、系统锁相带宽等特性进行了研究。系统开环时,输出功率在 71~271 mW 之间起伏,系统闭环后,输出功率稳定在 412 mW 左右,较开环平均功率提高了 2.1 倍,说明该方案能够实现有效的相位锁定。系统锁相带宽大于 50 kHz,具有较好的稳定锁相能力。通过提高各路光纤放大器的功率和采用承受功率更高的合束器,有望获得更高功率的相干合成输出。

关键词 光纤光学; 光纤激光; 相干合成; 全光纤; 被动锁相

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1005001

Research of All-Fiber Laser Coherent Combining System Based on Fiber-Loop

Yang Baolai Wang Xiaolin Zhou Pu Ji Xiang Xu Xiaojun

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A scheme of all-fiber laser coherent combining system based on fiber-loop is put forward and passive coherent combining of four fiber laser beams is realized in all-fiber configuration with home-made fiber amplifiers. The power, spectrum and far-field beam pattern of the combined open loop and closed loop as well as the bandwidth of passive phasing are also investigated. When the system is in open loop, the output power varies from 71 mW to 271 mW. When the system is in closed loop, the output power is around 412 mW. The output power with system in closed-loop state is quite stable, and 2.1 times higher than the average output power in open-loop state, indicating that the scheme can realize stable phase locking. The bandwidth of the system is over 50 kHz, implying good ability of passive phasing. By improving the power of the amplifiers and adopting combiners with higher handling power, it is possible to obtain coherent combining output with higher power.

Key words fiber optics; fiber laser; coherent combining; all fiber; passive phase locking

OCIS codes 140.3510; 140.3298; 140.3280

1 引 言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑、热管理方便等优点,受到广泛的关注和研究。近年来,随着半导体激光器功率和双包层掺杂光纤的制造工艺不断提升,光纤激光器的输出功率迅速提升。2009年,IPG公司推出了9.6 kW的单模光纤激光器,至此单纤激光功率进入万瓦级^[1]。然而,

由于介质的非线性效应和热损伤机制等,单路激光的功率仍然受限,同时由于单根光纤单模输出存在功率上限^[2],采用多路激光相干合成是获得更高功率的一种有效途径。相干合成锁相方式分为主动锁相^[3-10]和被动锁相^[11-16],主动式相干合成是利用反馈控制技术,通过算法控制和相位调制器件,快速精确地控制由同一种子光分束放大的各路激光的相

收稿日期: 2014-01-15; **收到修改稿日期:** 2014-03-14

作者简介: 杨保来(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光相干合成方面的研究。

E-mail: yangbaolai1989@163.com

导师简介: 许晓军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事气动光学、自适应光学和光纤/固体激光相干合成等方面的研究。E-mail: xuxj@21.cn.com(通信联系人)

位。2011年,麻省理工学院林肯实验室 Yu 等^[5]利用八路商用的 500 W 光纤放大器,通过随机并行梯度下降(SPGD)算法主动控制锁相,实现了 4 kW 相干合成输出。被动式相干合成则是通过光反馈耦合等技术,使各路激光自发实现相位锁定,结构相对简单。2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所研究人员采用光反馈环形腔结构实现了四路光纤放大器的被动相位锁定,四路合成输出达 1062 W^[14]。

全光纤结构具有结构紧凑、稳定性好、便于模块化等优点,在激光器和放大器都已实现全光纤化的基础上,实现合束方式的全光纤化是光纤激光相干合成的发展趋势。全光纤自组织合成是激光器与合束方式都实现全光纤化的方案,且锁相方式简单,易于实现,国内外学者们展开了深入研究。2011年, Wang 等^[17]利用大模场光纤激光器分别实现了两路和四路光纤激光的自组织合成,合成输出最大功率分别为 101.5 W 和 144 W。

基于光反馈环形腔结构和全光纤激光相干合成的优点,本文提出了全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成方案。该方案中,光纤放大器均采用全光纤结构,由光纤放大器和光纤耦合器组成光纤环路,实现了全光纤结构激光相干合成。该方案采用被动式相位控制,通过光反馈信号实现多路激光的相位锁定,锁相方式简单、易于实现。基于该方案,建立实验系统,并对相干合成输出光束的功率、光谱、远场光斑形态、锁相控制带宽进行研究。

2 实验装置及原理

全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成实验装置如图 1 所示,波长为 1064 nm 的单频种子光(功率为 42 mW),注入 80:20 1×2 的光纤耦合器 20%端

口,输出经过两级掺 Yb 保偏光纤放大器(A0-1、A0-2)组成的预放大,然后通过 1×4 的光纤耦合器分为四束,分出的四束光分别作为四路掺 Yb 保偏光纤放大器(A1~A4)的信号光进行放大,放大后的四路光经过 4×1 的光纤耦合器合束,合成输出光束通过 1×3 的光纤耦合器,分出 80%的光用于监测功率,分出 10%的光用于测量光谱、光斑形态等,余下的输出光作为反馈信号光经过反馈光纤放大器(A0-F)放大,然后通过 80:20 光纤耦合器 80%端口注入到光纤环路中。

实验中所有光纤及器件都使用保偏光纤器件,光纤放大器是自行搭建的,使用波长为 974 nm 的半导体激光器抽运,掺 Yb 保偏单模光纤为增益介质,纤芯直径为 6 μm,包层直径为 125 μm。放大器中使用中心波长为 1064 nm 的带通滤波器件,并且每路光纤放大器输出端接保偏隔离器,保证光束单向传输。

实验时,依次开启种子光和各级光纤放大器,系统处于开环状态,使用功率计(Thorlab, PM100A)监测 1×3 的光纤耦合器的 80%输出端的功率,根据测得的功率和所使用耦合器的分光比,计算反馈信号功率。在反馈信号光足够强的情况下,开启反馈放大器并缓慢增加抽运功率,同时缓慢关闭种子光源,种子光完全关闭时,系统闭环,实现被动的相位锁定。

通过在合成的四路放大器其中一路加入相位调制器(PM),使用函数发生器(AFG)对相位调制器施加一定频率、一定幅度的调制信号,在单路放大器中施加相位扰动,相位扰动影响四路光束的相位锁定。通过对合成效果即合成输出功率的监测,判定系统的带宽。

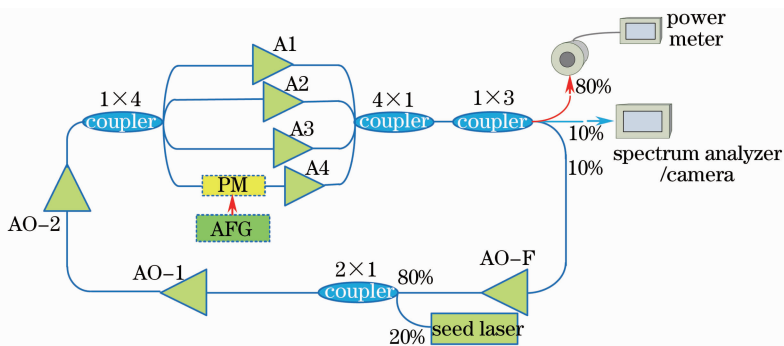


图 1 基于光纤环的全光纤激光相干合成实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of all-fiber laser coherent combining system based on fiber-loop

本实验系统实现相位锁定的原理,与空间结构光反馈环形腔相干合成的锁相原理类似^[13,18-19]。

假设实验中合成的每一路光束光程为 $(nL)_i, i = 1, 2, 3, 4$, 其中 n 为光纤折射率, L 为光纤几何长度, 那

么对应的每路光的相位可以表示为

$$\Phi_i = \omega (nL)_i / c, \quad (1)$$

式中 ω 为角频率。由于各路光纤放大器长度不相等,同时受热效应和环境扰动的影响,各路光束的光场相位并不相同,且处于不断的变化中。四路光束的合成光场可以表示为

$$E(\omega) = \sum_{i=1}^4 A_i \exp(i\Phi_i), \quad (2)$$

式中 A 为光场振幅。当系统处于开环状态时,由于各路光束之间相位差不断变化,系统无法实现有效相位锁定。当种子激光缓慢关闭、反馈放大器逐渐开启,系统处于闭环状态时,系统形成全光纤环形腔。由于 Yb^{3+} 具有较宽的增益带宽,系统闭环时,由于没有种子激光注入,在增益带宽内能够存在不同频率的多个纵模,四路合成光束中只有满足

$$\Delta\Phi = 2q\pi, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3)$$

的纵模,即同相纵模,能够在多个模式的竞争中处于优势,得到增益放大,而其他不满足(3)式的非同相模式,受到抑制,甚至消失。由于整个光纤环路只有几十米,而环境扰动一般只有百赫兹量级,可以认为,在很短的时间内,各路光之间的相位差没有变化,而激光能够在光纤环内循环上千次。因此,虽然存在热效应和环境扰动影响各路光的相位,但是系统能够实时地选择处于同相的纵模,进行增益放大,实现相位锁定。

3 结果与分析

实验中,测试了各路放大器的输出功率,如图2所示。由于所使用器件损耗、熔接损耗及抽运源功率的差异,四路放大器输出功率的功率稍有不同,实

验中四路放大器(A1~A4)的功率分别为 172、169、133、140 mW。

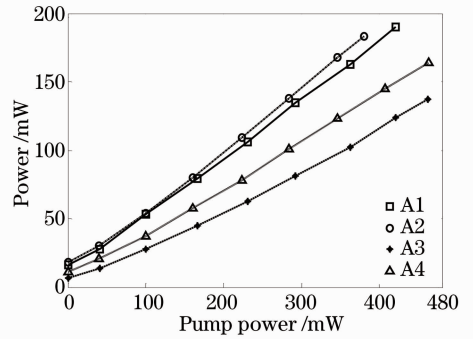


图2 四路光纤放大器(A1~A4)的功率
Fig. 2 Power of four amplifiers (A1~A4)

在已搭建的各路光纤放大器的基础上,利用图1的实验装置,依次开启种子光源、两级预放和四路放大器,系统处于开环状态,由于各路存在一定的相位噪声,合成输出功率在 71~271 mW 起伏,平均功率为 198 mW。开启反馈放大器并缓慢关闭种子光源,系统实现闭环锁相,获得了稳定的功率输出,闭环状态下平均功率为 412 mW,如图3(a)中的开闭环曲线所示。系统闭环状态下的平均功率比开环状态下提高了 2.1 倍。对系统多次开环闭环,测得的功率如图3(b)所示,系统闭环功率稳定,重复性好。

闭环状态的平均功率比开环提高 2.1 倍,主要有两个原因:1) 反馈信号经放大器放大,功率相比于种子激光更高,功率更高的反馈光使得四路放大器的输出功率都有一定提升,进而整个系统合成输出功率提升;2) 当系统实现被动的相位锁定时,各路光束相干叠加,相干叠加的合成光场强度要比未锁相的合成光场强度有所提高,反映在功率上即是闭环功率比开环平均功率有所提高。

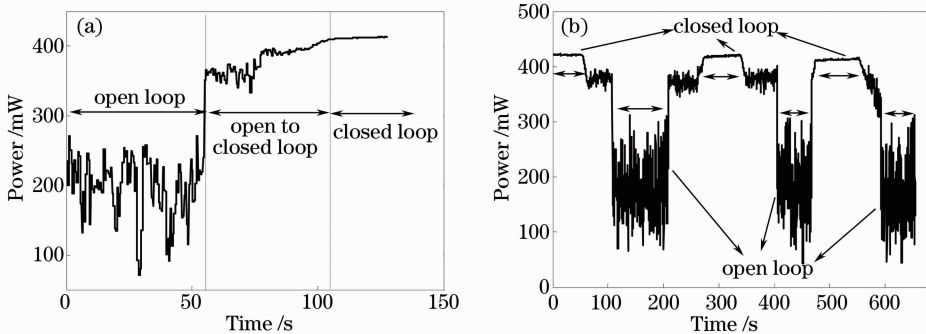


图3 系统开环和闭环状态下的输出功率。(a) 单次开闭环功率;(b) 多次开闭环功率

Fig. 3 Output power of the system in open-loop and closed-loop. (a) Open and close feedback loop once; (b) open and close feedback loop several times

为研究相干合成输出光谱,使用光谱仪(YOKOGAWA,AQ6370C)测量合成输出光谱。由于种子光源为单频光,经过两级预放和四路光纤放大器(A1~A4)放大,每路放大器的输出光谱相同,如图4(a)所示。四路光纤放大器(A1~A4)输出经过 4×1 光纤耦合器合束,提取10%输出光放大作为反馈注入到环路中,实现系统闭环,闭环状态时合成输出光包含多个波长,波长在1058~1068 nm之间,且不断变化,典型光谱如图4(b)所示。根据如前所述的系统锁相原理,当系统闭环时,输出光束包含多个纵模,同相的纵模将获得较高增益,不断增强,非同相的纵模逐渐减弱,甚至消失^[18,20],Yb³⁺较

宽的增益带宽允许存在不同波长的多个纵模能够稳定锁相,因而合成输出包含多个波长。由于在光纤放大器中使用了中心波长为1064 nm的带通滤波器件,因而合成输出波长被限制在带通滤波器件的通光范围内,即1058~1068 nm之间。实验中,光纤受环境扰动和热效应等因素影响,各路光纤的相位不断变化,系统闭环时能够实时选择其他一些频率的同相纵模实现相位锁定,因而测得的光谱不断变化。本实验合成输出光谱与以往空间结构光反馈环形腔的被动锁相相干合成^[15,20]类似,输出激光都包含多个波长且不断变化,同时也验证了多波长光纤激光能够实现稳定锁相相干合成。

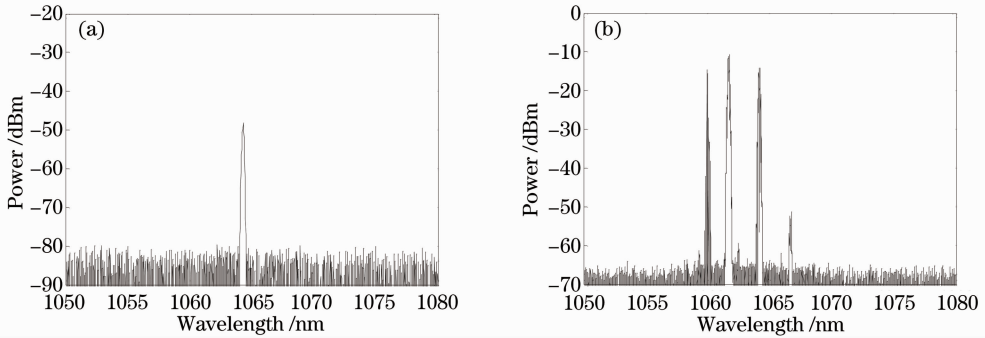


图4 (a) 光纤放大器 A1~A4 的输出光谱; (b) 系统闭环时的输出光谱

Fig. 4 (a) Spectrum after amplifiers A1~A4; (b) spectrum of the output laser beam with system in closed-loop state

使用光斑分析仪(Ophir,SP620U)测试了合成输出激光的远场光斑图样,由于整个实验系统使用的光纤都为单模光纤,所以合成输出激光是基模光束。系统开环时,由于合成输出功率起伏,远场光斑图样也表现为亮暗起伏,如图5(a)、(b)、(c)所示。系统闭环时的远场光斑图样如图5(d)所示,光斑十

分稳定且光强明显提高。由于合成采用单口径输出,远场光斑图样的亮暗起伏反映了输出功率的变化。而使用光纤耦合器作为合束器件的优势是使合成光束实现单口径输出,避免了空间拼接合束造成的旁瓣能量耗散,保证了合成输出光束具有与合成前光束相同的光束质量。

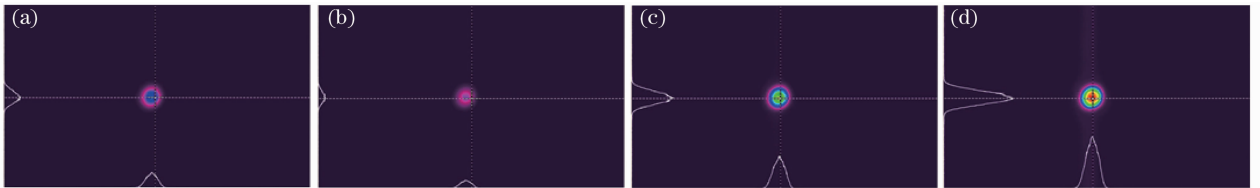


图5 合成输出的远场光斑图样。(a)(b)(c) 开环; (d) 闭环

Fig. 5 Far-field beam patterns of combining output laser. (a)(b)(c) Open-loop; (d) closed-loop

在锁相控制带宽的测试中,所使用的LiNbO₃相位调制器的理论半波电压为2.2 V,以半波电压为调制幅度,施加正弦信号调制,随着调制频率的逐渐增加,相位扰动频率逐渐增高,因而各路光束相干叠加合成光场强度减小,反映在输出功率上即为合成输出功率降低。对相位调制器件施加50 kHz和2.2 V正弦调制信号,实验系统开环和闭环的合成输出功率如图6所示。系统开环状态下合成输出功

率有较大起伏,闭环后输出功率稳定,能够实现稳定锁相,说明系统的锁相控制带宽大于50 kHz。

4 结 论

提出了全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成方案,在自制的光纤放大器基础上,实现了四路光纤激光的被动锁相全光纤相干合成。系统闭环输出功率稳定,平均功率为412 mW,较开环平均功率

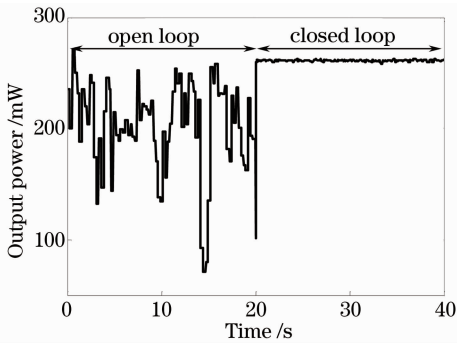


图 6 相位调制器施加 50 kHz, 2.2 V 正弦调制信号时, 开环和闭环状态下的输出功率

Fig. 6 Output power of the system in open-loop and closed-loop when phase modulator is driven by sine signal with 50 kHz frequency and 2.2 V amplitude

198 mW 提高了 2.1 倍。系统锁相带宽大于 50 kHz, 远高于环境扰动频率。该方案无论光纤放大器还是合束方式, 均采用全光纤结构, 性能稳定, 同时采用被动锁相, 锁相方式简单、易于实现。系统中各路激光采用了主振荡器放大结构, 便于实现模块化 and 功率拓展。通过增大单路激光功率和增加合成路数, 使用能够承受更高功率的光纤耦合器或者光纤合束器作为合束器件, 有望实现更高功率的全光纤激光被动锁相相干合成。

参 考 文 献

- 1 M O Connor, V Gapontsev, V Fominb, *et al.*. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW[C]. High Power Solid-State CLEO Symposium; Multikilowatt Solid-State Lasers, 2009.
- 2 J W Dawson, Michael J Messerly, Raymond J Beach, *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. Opt Express, 2008, 16(17): 13240–13266.
- 3 Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin, *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application[J]. J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(2): 248–256.
- 4 Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing, *et al.*. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 518–524.
刘泽金, 周 朴, 侯 静, 等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 518–524.
- 5 C X Yu, S J Augst, S M Redmond, *et al.*. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. Opt Lett, 2011, 36(14): 2686–2688.
- 6 X Wang, J Leng, P Zhou, *et al.*. 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array[J]. Appl Phys B, 2012, 107: 785–790.

- 7 Su Rongtao, Zhou Pu, Ma Yanxing, *et al.*. Coherent beam combining of two nanosecond fiber pulse lasers[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102004.
粟荣涛, 周 朴, 马阎星, 等. 两路纳秒脉冲光纤激光相干合成的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102004.
- 8 Ma Yanxing, Si Lei, Dong Xiaolin, *et al.*. Study on cost function in the coherent beam combination of fiber lasers based on dithering technique [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202003.
马阎星, 司 磊, 董小林, 等. 抖动法激光阵列相干合成技术中的性能评价函数研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202003.
- 9 Ma Pengfei, Zhou Pu, Ma Yanxing, *et al.*. Development of the polarization beam combining technique of lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070005.
马鹏飞, 周 朴, 马阎星, 等. 激光相干偏振光束合成技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070005.
- 10 Ma Pengfei, Zhou Pu, Ma Yanxing, *et al.*. Study of coherent polarization beam combining technique of multi-channel fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0402009.
马鹏飞, 周 朴, 马阎星, 等. 多路光纤激光相干偏振合成技术研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0402009.
- 11 Bing Lei, Ying Feng. Phase locking of an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop[J]. Opt Express, 2007, 15(25): 17114–17119.
- 12 Baishi Wang, Eric Mies, Monica Minden, *et al.*. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array[J]. Opt Lett, 2009, 34(7): 863–865.
- 13 Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao, *et al.*. Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900129.
周 军, 何 兵, 薛宇豪, 等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900129.
- 14 Xue Yuhao, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. High power passive phase locking of four Yb-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(5): 054212.
- 15 Yuhao Xue, Bing He, Jun Zhou, *et al.*. Array size scaling of passive coherent beam combination in fiber laser array[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(1): 011401.
- 16 Thomas H Loftus, Alison M Thomas, Marc Norsen, *et al.*. Four-channel, high power, passively phase locked fiber array [C]. Advanced Solid-State Photonics, 2008.
- 17 Baishi Wang, Anthony D Sanchez. All-fiber passive coherent combining of high power lasers[J]. Opt Eng, 2011, 50(11): 111601.
- 18 Erik J Bochove, Sami A Shakir. Analysis of a spatial-filtering passive fiber laser beam combining system [J]. J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(2): 320–327.
- 19 Joshua E Rothenberg. Passive coherent phasing of fiber laser arrays[C]. SPIE, 2008, 6873: 687315.
- 20 Zhou Jun, He Bing, Qi Yunfeng, *et al.*. Passive phase locking of fiber laser based on spatial filtering[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(11): 7869–7874.
周 军, 何 兵, 漆云凤, 等. 基于空间滤波的光纤激光被动相干锁定技术研究[J]. 物理学报, 2010, 59(11): 7869–7874.

栏目编辑: 王晓瑛