

文章编号: 0258-7025(2010)09-2314-04

四路二维掺镱光纤激光被动相干组束实验研究

薛宇豪^{1,2} 周军¹ 何兵¹ 李震^{1,2} 漆云凤¹ 刘驰^{1,2} 楼祺洪¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对基于空间滤波原理的光反馈环形腔光纤激光阵列的被动相干组束技术进行了实验研究。采用自行研制的四路保偏掺镱光纤放大器,建立了二维光纤激光相干组束实验系统,通过同相信号光的有效反馈,实现了各路放大激光的同相输出,获得了稳定的二维远场相干图样,相干对比度达 91.7%,相干耦合效率为 94.5%。并观测到被动锁相时的多纵模相干输出现象。

关键词 激光器;光纤激光;相干组束;被动相位锁定

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2314

Passive Coherent Beam Combination of Four Yb-Doped Fiber Lasers in Two-Dimensional Distribution

Xue Yuhao^{1,2} Zhou Jun¹ He Bing¹ Li Zhen^{1,2} Qi Yunfeng¹
Liu Chi^{1,2} Lou Qihong¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Coherent beam combination of Yb-doped fiber laser array is studied experimentally by spatial filtering to passive phase locking. The system of coherent beam combination by Yb-doped fiber amplifiers array in two-dimensional distribution is built. The four polarization maintaining Yb-doped fiber amplifiers are developed. By optical feedback of in-phase signal, the in-phase output of all amplified lasers is achieved and two-dimensional far-field stable interference pattern is obtained. The coherent contrast ratio is up to 91.7% and coherent coupling efficiency is 94.5%. Coherent output of multi-longitudinal modes is also observed in phase locking.

Key words lasers; fiber laser; coherent beam combination; passive phase locking

1 引言

随着半导体激光(LD)抽运技术和双包层光纤制作工艺的提高,光纤激光及放大器的输出功率得到了极大的提升,2009年,IPG公司实现了9.6 kW的单模连续光纤激光输出^[1]。高功率、高光束质量

的激光在许多领域有着广泛的应用,如材料加工、激光武器、激光通信等。但是由于光纤本身的非线性效应[受激拉曼散射和受激布里渊散射(SBS)]、热效应、端面损伤阈值以及抽运源的耦合限制,单根光纤激光与放大器的功率提升受到很大的限制,理论

收稿日期: 2010-04-07; 收到修改稿日期: 2010-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(60908011, 60907045)、国家 863 计划(2008AA03Z405)和上海市科技启明星基金(09QB1401700)资助课题。

作者简介: 薛宇豪(1985—),男,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: yuhao123105@163.com

导师简介: 周军(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

分析得单根光纤单模输出的上限为 $36 \text{ kW}^{[2]}$ 。为了获得百千瓦或更高的功率,研究人员提出了组束技术,通过将多路激光叠加来进一步提高输出功率并保持高的光束质量。目前,组束技术主要有相干组束(CBC)和光谱组束(SBC)^[3],相干组束又包括主动相位锁定^[4~7]和被动相位锁定两种方式^[8~14]。

被动相位锁定技术不需要任何相位控制元件和复杂的电路控制,可以快速稳定地实现多路激光相干,结构简单、响应速度快,在国内外引起了广泛关注,其有许多不同形式的结构。2005年, Hans Bruesselbach 等^[8]采用自组织结构实现了 10 路光纤激光阵列的被动相干组束。2006年, Bing He 等^[11]采用自成像腔结构,实现了两路掺镱光纤激光器的相位锁定。2007年 Bing Lei 等^[13]通过光纤耦合环路来进行相互注入锁定,实现了三路掺镱光纤激光器的被动相干组束。在自组织与相互注入锁定的方案中,由于光纤耦合器可承受的功率有限,在高功率相干输出方面受到了极大的限制。最近本课题组李震等采用光反馈环形腔结构实现了一维三路掺镱光纤(YDF)放大器的被动相干组束,在该方案中通过同相光信号的光反馈实现了多路激光的实时相位锁定,无需复杂的相位探测和反馈电路。同时,由于该系统中单路激光采用光纤放大器的工作方式,可通过多级光纤级联放大实现相干耦合功率的有效提升,同主动相位控制的光纤激光相干组束技术类似,具有很好的功率可扩展性。在前期三路掺镱光纤放大器的被动相干组束的工作中,由于三路光束是一维排列的,远场相干光斑为条纹状分布。

本文采用环形腔结构进行了二维光纤激光的被动相干组束实验研究,简要分析了光反馈被动相位锁定技术的基本原理;在一维三路环形腔被动相干组束的基础上,对整个系统进行了结构和参数优化;建立了二维光纤激光相干组束实验系统,实现了四路二维掺镱光纤放大器的相位锁定;获得了中心主瓣能量更为集中、稳定的远场二维干涉图样,并在相位锁定和非锁定下对输出功率进行了测量和分析。

2 光反馈被动相位锁定的原理

图 1 为光反馈被动相位锁定的原理图,由光纤放大器阵列(A)和一个单模反馈光纤(FF)回路组成,光纤放大器阵列输出的激光经过一个分束镜(BS),反射的小部分光通过聚焦透镜(L)耦合进入反馈光纤,经过分束器(C)均匀地分成四路信号光,再次进入光纤放大器阵列,从而构成环形腔结构。

其中每一路光纤放大器的输出相位为

$$\phi_i = \omega(nL)_i/c.$$

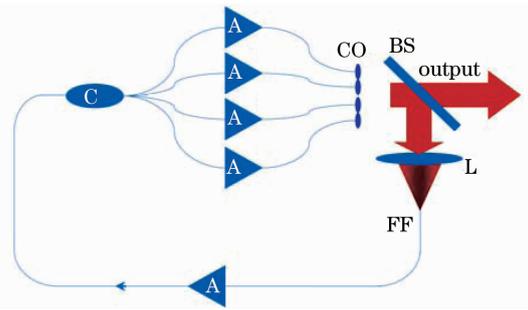


图 1 光反馈被动相位锁定的原理图

Fig. 1 Principle of optical feedback passive phase locking

由于外界振动和热效应的影响,每一路的光程 nL 会发生变化,输出相位也在随机变化。由于采用了光反馈的方式,在很短的时间内可以认为每一路的输出相位是不变的,此时在某些纵模频率 ω 下,经过四路光纤放大器输出到达反馈聚焦透镜焦点处的相位一致,干涉叠加形成亮斑,当反馈光纤处于透镜焦点位置时,这些纵模进入回路,具有高的增益放大,在环形腔内循环运转,实现同相输出,而其他非同相的纵模得到抑制。当其中一路或者几路的输出相位改变以后,另外一些频率的纵模在透镜焦点处仍然可以实现同相输出,因此光反馈被动相位锁定技术是通过反馈光纤选择不同频率的纵模来实现相位锁定的。

3 实验装置

图 2 为四路二维光反馈被动相干组束实验装置,其由参考光 1064 nm 半导体激光器,四路掺镱单频保偏光纤放大器和单模反馈光纤放大回路组成,单模反馈光纤通过 3 个 $50:50$ 的光纤分束器,同保偏光纤放大器的种子输入端熔接在一起,构成环形腔结构。波长为 1064 nm 的 LD 作为参考光用于实验中的光路调试,其与单模反馈光纤经过一个 $50:50$ 的合束器后耦合入各路光纤放大器中。光纤放大器为自行研制的掺镱单频保偏光纤放大器,抽运源为 975 nm 波长的半导体激光器,经过保护装置(protector)和合束器(WDM)进入双包层单模放大光纤(YDF),纤芯直径 $6 \mu\text{m}$,内包层直径 $125 \mu\text{m}$,在放大器输出端与隔离器(ISO)连接,防止激光反向传输。四路光纤放大器的输出经过准直器(CO)准直,近场光斑直径为 3.4 mm ,排列为正方形,光斑间距 9 mm 。分光镜(BS)反射的 10% 的光经过聚焦透镜 L1 耦合入反馈光纤中,作为种子光

再次进入四路放大器阵列。经过 BS 透射的 90% 的能量作为相干耦合输出, 通过傅里叶透镜 L2 在焦点处实现相干叠加, 利用 CCD(型号 SP620U) 和

SpiriconInc 公司生产的 LBA-USB-SP 激光光束分析仪来记录相干图样以及数据。

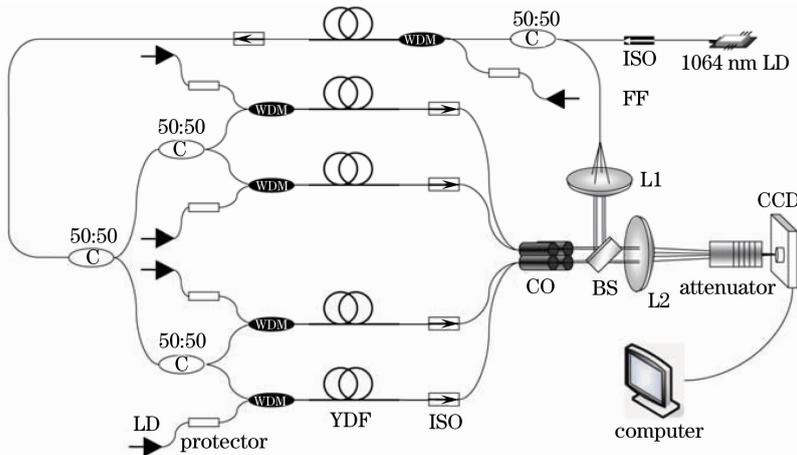


图 2 四路二维掺镱光纤放大器相干组束实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of coherent beam combination of four Yb-dop fiber amplifiers array in two-dimensional distribution

4 结果与讨论

利用图 2 中的实验装置, 通过精密调节, 实现了四路二维光纤放大器阵列被动相位锁定, 利用 CCD 记录了其干涉图样。在开启 1064 nm LD 参考光时, 各路光纤放大器独立运行, 相位随机变化未锁定, 其远场光斑图样如图 3(a) 所示。图 3(b) 为光反馈回路建立后关掉 1064 nm LD 参考光时远场干涉图样, 此时各路放大器实现了稳定的同相位锁定输出, 其能量主要集中在中心亮斑上, 在 X, Y 方向的

对比度分别为 91.7% 和 90.1%。图 4 中曲线 1 为在相位锁定时的输出功率曲线, 最大相干输出功率为 2.13 W, 未出现饱和现象, 如果继续提高抽运源的功率, 可以进一步提高相干输出功率。图 4 中曲线 2 为在断开光反馈光纤回路, 开启 1064 nm LD 种子光时的功率曲线, 略高于相位锁定状态下的功率。这是由于耦合进入反馈光纤中的信号光功率比 LD 种子光的功率小造成的。通过图 4 比较可得, 相位锁定与非锁定下的相干耦合效率均为 94.5%。

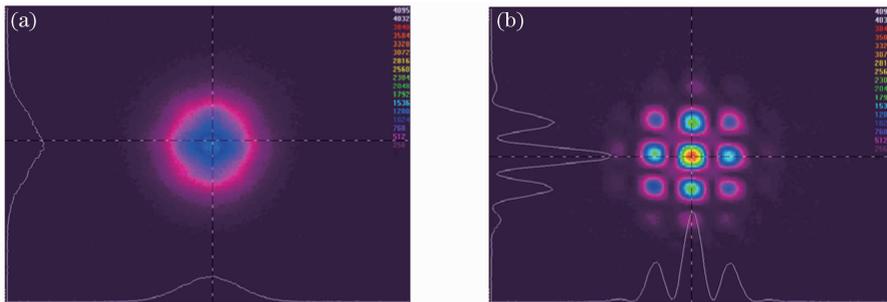


图 3 四路光纤放大器阵列干涉图样。(a) 相位非锁定; (b) 相位锁定

Fig. 3 Interference patterns of four fiber amplifiers array. (a) non-locking; (b) phase locking

实验中发现在相位锁定后, 其输出光谱包含多个不同波长的纵模, 波长在 1072~1082 nm 范围内变化, 如图 5 所示。这是因为掺镱光纤的增益带宽较宽, 光反馈相位锁定通过选择不同波长的纵模来实现锁相, 所以同时可以存在多个同相频率的纵模运转。由于外界振动和热效应的影响, 各路光纤放大器到达反馈光纤的相位会发生变化, 系统将选择

其他波长的纵模来实现相位锁定, 因此虽然观察到输出光谱中多波长同时出现且在不断变化, 但相干耦合输出功率和远场相干图样并无变化, 十分稳定。此外, 由于掺镱光纤的增益带宽较宽, 通过在系统中引入合适波长和带宽的滤光片(如 1064 nm, 2 nm), 可实现对相干耦合输出激光光谱宽度的有效控制, 但依然是多波长同时输出。多波长激光同时输出的

这一光谱特性,可以有效地抑制受激布里渊散射效应对光纤放大器输出功率提升的影响,从而有利于获得更高功率的相干耦合输出。

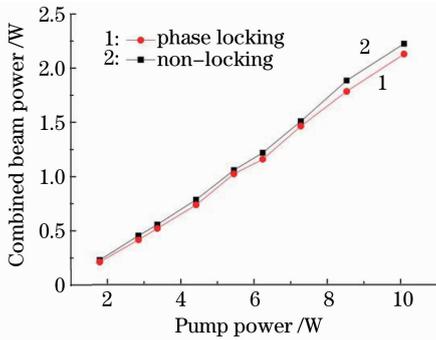


图 4 相位锁定和非锁定下的输出功率曲线

Fig. 4 Output power curves in phase locking and non-locking

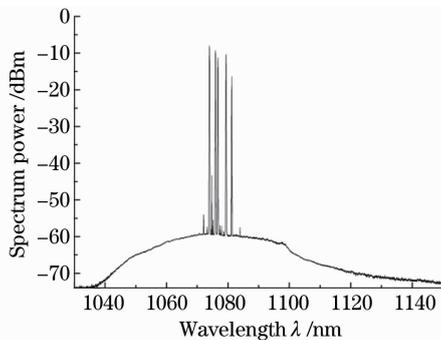


图 5 相位锁定时的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum in phase locking

5 结 论

采用光反馈被动相位锁定技术,通过选择不同频率的纵模,实现了二维四路掺 Yb 光纤放大器的相干组束,并获得了稳定的干涉图样,相干对比度高达 91.7%,相干耦合效率为 94.5%。该环形腔被动锁相系统结构简单,只通过光反馈信号就可以实现多路放大激光稳定的相位锁定,同时单路光纤放大器不是单频,而是多波长同时输出,在高功率放大时可以有效地抑制受激布里渊散射的影响。由于系统中单路激光采用了激光主振荡放大(MOPA)结构,具有良好的功率扩展性。目前只采用了两级放大,相干耦合输出功率为 2.13 W。通过系统结构参数优化,增加一级光纤功率放大器或增大光纤

放大器的路数,相干耦合输出的功率和效率将会得到进一步提高。

参 考 文 献

- 1 M. O'Connor, V. Gapontsev, V. Fomin *et al.*. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW [C]. *Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, 2009, CThA3
- 2 Jay 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 O. Schmidt, C. Wirth, I. Tsybin *et al.*. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1567~1569
- 4 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 5 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(23): 231106
- 6 Eric C. Cheung, James G. Ho, Gregory D. Goodno *et al.*. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 354~356
- 7 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
- 8 Hans Bruesselbach, Monica Minden, J. L. Rogers *et al.*. 200 W self-organized coherent fiber arrays[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2005, CMDD4
- 9 Hans Bruesselbach, D. Cris Jones, Metin S. Mangir *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1339~1341
- 10 Li Jianfeng, Duan Kaihang, Wang Jianming *et al.*. Experiment of coherence-locking of two photonic crystal fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926
李剑峰,段开樟,王建明等.两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- 11 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 12 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280
何兵,楼祺洪,周军等.两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 13 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
- 14 Bing Lei, Ying Feng. Coherent combining of tunable erbium-doped fiber lasers by a single-mode fiber feedback loop[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1018~1021