

文章编号: 0253-2239(2008)05-0923-04

# 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究

李剑峰<sup>1,2</sup> 段开棕<sup>1</sup> 王建明<sup>1</sup> 王屹山<sup>1</sup> 赵 卫<sup>1</sup> 郭永康<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)  
<sup>2</sup> 四川大学物理科学与技术学院纳光子研究所, 四川 成都 610064)

**摘要** 利用自成像腔技术进行光子晶体光纤(PCF)激光器光束相干合成的实验研究, 实现了两光子晶体光纤激光器的相位锁定。在不使用滤波器的情况下, 实验仍能观测到清晰的干涉图样, 且在高功率输出状态以及环境噪声情况下干涉图样仍可保持稳定, 表明具有单模大模场特性的光子晶体光纤在实现光束相干合成方面比传统的双包层光纤(DCF)有明显的优越性。实验还表明耦合输出镜的反射率对相干输出功率有一定影响, 当反射镜的反射率分别为 5%, 10% 和 15% 时, 两台激光器相干输出斜率效率分别为 63.8%, 61.6% 和 60.2%。在抽运功率为 150 W 和耦合输出镜的反射率为 5% 时, 获得 95.8 W 的最大相干功率输出, 相干功率合成效率为 90.2%。实验中无任何热光效应产生, 有望利用该方法获得更高的相干输出功率。

**关键词** 激光技术; 相干合成; 自成像腔; 高功率光纤激光器; 光子晶体光纤; 相位锁定

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## Experiment of Coherence-Locking of Two Photonic Crystal Fiber Lasers

Li Jianfeng<sup>1,2</sup> Duan Kailiang<sup>1</sup> Wang Jianming<sup>1</sup> Wang Yishan<sup>1</sup> Zhao Wei<sup>1</sup> Guo Yongkang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> Institute of Nano Optics, College of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

**Abstract** Beam coherent combination of two photonic crystal fiber (PCF) lasers is experimentally studied by using self-imaging resonator technique, and phase-locking of the two PCF lasers is achieved. Clear and stable interference strips are observed even without a filter in high-power operation and in environmental noise condition. The advantages of PCF laser in coherent combination over the conventional double-cladding fiber (DCF) are demonstrated. Experiments also show that the reflectivity of coupling output mirror affects coherent output power. The slope efficiencies of two PCF lasers running in in-phase mode are 63.8%, 61.6% and 60.2% for the reflectivity 5%, 10% and 15% of the reflector, respectively. The maximum coherent output power of 95.8W and the combination efficiency of 90.2% are obtained when the pump power is 150 W for the reflectivity of 5%. No thermo-optical problems occur during the experiments, which means that a higher coherent power can be further achieved by using this technique.

**Key words** laser technology; coherent combination; self-imaging resonator; high-power fiber laser; photonic crystal fiber; phase-locking

## 1 引 言

光纤激光器具有光束质量好、体积小、重量轻、转换效率高、散热效果好等优点, 可广泛用于工业加

工、医疗、国防等领域<sup>[1]</sup>。特别是近年来发展的光子晶体光纤(PCF)激光器, 它利用光子晶体光纤具有无尽单模、大模场面积和大内包层数值孔径等特点,

收稿日期: 2007-10-22; 收到修改稿日期: 2007-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(60537060)和中国科学院“西部之光”“联合学者”项目(0729591213)资助课题。

作者简介: 李剑峰(1982—), 男, 讲师, 主要从事高功率光纤激光技术、激光光学等方面的研究。

E-mail: lijianfeng3000@sina.com.cn

在可实现高功率输出的同时,又保持很好的光束质量。现在光子晶体光纤激光器已有很大的发展,输出功率已达到了  $1.53 \text{ kW}^{[2]}$ ,但与常规双包层光纤激光器一样,进一步提高光子晶体光纤激光器的输出功率仍会面临光纤的热、光损伤等问题<sup>[3]</sup>。为达到更高的激光输出功率,一种有效的技术途径是对多个光纤激光器输出的激光进行光束相干合成<sup>[4]</sup>。目前已发展了多种相干合成技术,可分为主动锁相和被动锁相两类。主动锁相技术的典型代表为主振荡器功率放大器(MOPA)系统<sup>[5]</sup>,它要求对每路光束的相位进行检测、反馈以实现对相位的控制,技术较为复杂。被动锁相技术主要包括 Talbot 腔<sup>[6]</sup>,自傅里叶腔技术<sup>[7]</sup>,多芯光纤的倏逝波耦合技术<sup>[8]</sup>,全光纤耦合技术<sup>[9]</sup>和自成像腔技术<sup>[10]</sup>等。其中 Talbot 腔和自傅里叶腔对光纤阵列的排列精度要求高,而且通过腔镜反射耦合进入各光纤的效率较低。多芯光纤的倏逝波耦合和全光纤耦合技术最终也要面临单根光纤高功率输出的限制。自成像腔有着结构简单,合成效率高等优点。尤其是光纤激光器增益介质具有较宽的增益谱,腔长选择自由度大, Q 值低等特点使得自成像腔中的自调制过程更易实现<sup>[10]</sup>。利用自成像腔技术,2005 年 Peng 等<sup>[11]</sup>获得了  $2 \text{ W}$  的相干输出功率, Lou 等<sup>[12,13]</sup>获得了  $18.3 \text{ W}$  的相干功率输出,2006 年 He 等<sup>[14]</sup>获得了  $60 \text{ W}$  的相干功率输出。本文利用两光子晶体光纤激光器进行相干锁定的实验研究,利用自成像腔技术实现两光子晶体光纤激光器的相位锁定。

## 2 实验装置与原理

实验使用的自成像腔相干合成装置示意图如图 1 所示。LD<sub>1</sub> 和 LD<sub>2</sub> 为德国 Limo 公司生产的半导体激光器,作为两光子晶体光纤激光器的抽运源,抽运光中心波长为  $976 \text{ nm}$ ,由尾纤耦合输出。利用  $10 \text{ cm}$  短光纤对抽运光耦合进光纤的效率进行了测

试,约为  $75\%$ 。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 为对激光  $1040\sim 1070 \text{ nm}$  高反( $R>99.5\%$ )以及对抽运光  $970\sim 980 \text{ nm}$  高透( $T>95\%$ )的双色镜,分别作为两个激光器输入端的高反腔镜。PCF<sub>1</sub> 和 PCF<sub>2</sub> 为丹麦 Crystal Fiber A/S 公司生产的 DC-170-40 单模光子晶体光纤,其内包层的直径为  $170 \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.62$ ,纤芯直径为  $40 \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.03$ ,对  $976 \text{ nm}$  抽运光的吸收系数为  $13 \text{ dB/m}$ 。该光纤对  $1000\sim 1100 \text{ nm}$  波段的激光可实现单模输出,模场面积约为  $1000 \mu\text{m}^2$ 。PCF<sub>1</sub> 和 PCF<sub>2</sub> 的长度分别为  $2 \text{ m}$  和  $4 \text{ m}$ ,且端面处都进行了  $8^\circ$  角的抛光处理,用以减小激光在端面的菲涅耳反射。L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 为焦距  $11 \text{ mm}$  的非球面透镜,它们将两激光器输出的激光准直。M<sub>3</sub> 和 M<sub>4</sub> 为对激光部分反射( $5\%$ )的激光输出镜。P 为直角棱镜,它的两直角边镀有对激光高反的膜。棱镜 P 位于两光纤端面的中间,它将两相对传输的激光变为一对平行传输的光束,两平行光束之间的距离可通过移动棱镜 P 的前后位置方便地调节。L<sub>3</sub> 为傅里叶变换透镜,其焦距  $f=500 \text{ mm}$ ,其光轴位于两平行激光的中间,从 PCF<sub>1</sub> 和 PCF<sub>2</sub> 端面到 L<sub>3</sub> 的光程均为焦距  $f$ 。M<sub>5</sub> 为对激光部分反射( $5\%, 10\%, 15\%$ )的耦合输出镜,放置在 L<sub>3</sub> 的后焦面上。F 为一根直径为  $12 \mu\text{m}$  的高熔点( $1768.3^\circ\text{C}$ )铂金丝构成的空间滤波器,适当调制 F 的位置,可使它对异相模产生高损而对同相模低损<sup>[11,12]</sup>。当激光经过 L<sub>3</sub> 聚焦,被 M<sub>5</sub> 反射后再经过 L<sub>3</sub> 准直的过程相当于经过两次傅里叶变换,通过此过程 PCF<sub>1</sub> 和 PCF<sub>2</sub> 光斑能彼此成像到对方位置上,这样可实现两光子晶体光纤激光器的相互注入,由自组织过程实现相位锁定。当两路光纤的长度由于机械噪声或热噪声影响发生变化时,自调制过程将自发的选择满足两路腔长的纵模振荡频率<sup>[10]</sup>。L<sub>4</sub> 为成像透镜,其焦距  $f_1=400 \text{ mm}$ ,它放置在距离 M<sub>5</sub> 两倍焦距的位置,用以将 M<sub>5</sub> 上的光斑截面图样成像在 CCD 上。

## 3 实验结果与讨论

用 Photon 公司的光束分析仪 Beamprofiler 对输出耦合镜 M<sub>5</sub> 平面上的光斑图样进行实时监测。当只开启单台激光器 LD<sub>1</sub> 或 LD<sub>2</sub> 时,采集到的光斑图样分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示,光束质量较好<sup>[15]</sup>。图 3(a) 和图 3(b) 为同时开启 LD<sub>1</sub> 和 LD<sub>2</sub> 时分别在无滤波器和有滤波器两种情况下观测的光斑图样,图样显示了明显的干涉现象。比较图 2 和图 3,图 3 的干涉现象是由于实现了两台光子晶体激光

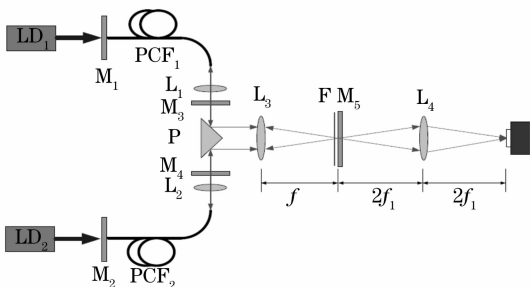


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

器的相位锁定,得到两束相干激光,而不是单束激光与其部分反射光( $M_3$  或  $M_4$  等对激光有部分反射)干涉引起的。图 3(a)中相干条纹的对比度相对较低,但相干条纹清晰稳定,在使用传统的双包层光纤激光器实验中是很难得到的<sup>[12,14]</sup>。主要是传统的双包层光纤激光器使用的光纤一般为多模光纤,尽管可使用弯曲光纤的方法对高阶模进行损耗,但其

输出的模式仍然不为严格的单模,还存在着部分高阶模,所以在激光器高功率运行时,横模的模式竞争仍然存在,导致了相干图样不稳定。而光子晶体光纤为严格的单模光纤,输出模式稳定,所以相干图样较为稳定,表明光子晶体光纤在相干合成中有明显的优势。图 3 (b)为有滤波器时的相干图样,其相干条纹的对比度比图 3(a)有所提高。

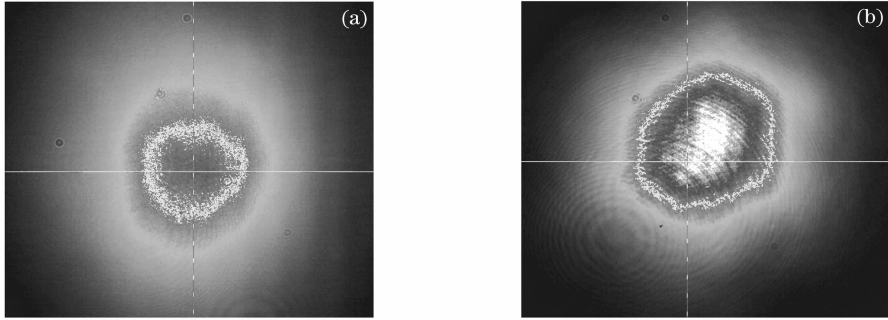


图 2 输出镜  $M_5$  处的光斑截面图样。(a)  $LD_1$  开启, (b)  $LD_2$  开启

Fig. 2 Beam profiles at output mirror when (a)  $LD_1$  is turned on, and (b)  $LD_2$  is turned on

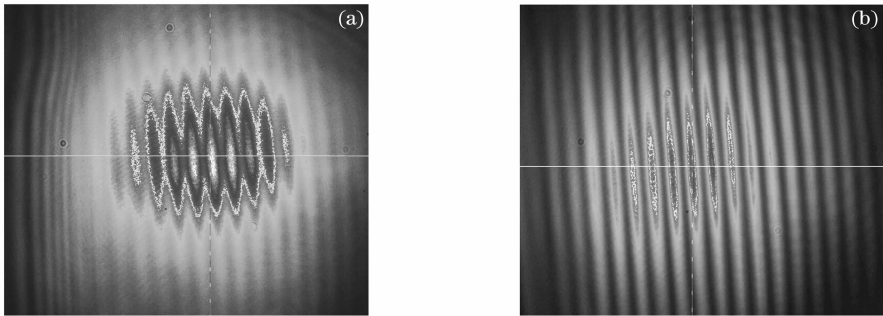


图 3  $LD_1$  和  $LD_2$  同时开启输出镜  $M_5$  处的光斑截面图样。(a)无空间滤波器, (b)有空间滤波器

Fig. 3 Beam profiles at output mirror when  $LD_1$  and  $LD_2$  are turned on (a) without a spatial filter, and (b) with a spatial filter

光纤介质对千赫兹噪声较为敏感,研究了机械噪声对光纤激光器相干锁定的影响,在对高功率抽运源冷却系统进行隔离和不隔离情况下分别观测光斑图样,在激光器高功率运转时,抽运源冷却系统的机械噪声对相干图样的影响不大。这种稳定性主要归因于实验系统中两光纤激光器有较低的  $Q$  值,较大的谐振腔腔长差,使得两光纤激光器在光纤增益介质较宽的增益带宽内,通过自调制过程容易找到适于复合谐振腔的相同纵模,因而系统在环境噪声的影响下仍具有较好的稳定性。

图 4 为两激光器单独运行时激光输出功率随抽运功率的变化。在抽运功率为 75W 时,激光器  $PCF_1$  和  $PCF_2$  单独运行的激光输出功率分别为 55.1 W 和 51.2 W,其斜率效率分别为 73%和 68%。由于光纤长度的不同,激光器  $PCF_1$  和  $PCF_2$  有不同的斜率效率。根据使用的光子晶体光纤参量和速率方程<sup>[15]</sup>

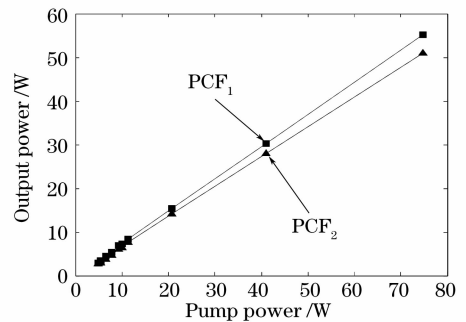


图 4 激光器  $PCF_1$  和  $PCF_2$  单独运行时激光输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4 Dependence of output laser power on pump power for  $PCF_1$  or  $PCF_2$  laser separately

对 75 W 正向抽运时激光功率和抽运光功率随光纤长度的变化做了模拟计算,结果如图 5 所示。光纤在 2 m 时已经基本达到增益饱和,因此此种光子晶体光纤的最佳长度为 2 m。但为了保证光子晶体光

纤激光器在光纤增益介质的增益带宽内有较多的相同纵模,应选择长度差别较大的光纤,选择长度分别为 2 m 和 4 m 的两根光纤。图 6 为耦合输出镜  $M_5$  的反射率分别为 5%, 10% 和 15% 时,两光子晶体光纤激光器同相模相干输出功率随抽运功率的变化。两光子晶体光纤激光器相干输出的斜率效率随  $M_5$  的反射率的增大而减小,当  $M_5$  的反射率分别为 5%, 10% 和 15% 时,两光子晶体光纤激光器相干输出斜率效率分别为 63.8%, 61.6% 和 60.2%。耦合输出镜的反射率对相干系统的输出功率有一定影响,在抽运功率为 150 W 及  $M_5$  的反射率为 5% 时,获得 95.8 W 的相干输出功率,相干合成效率为 90.2%。

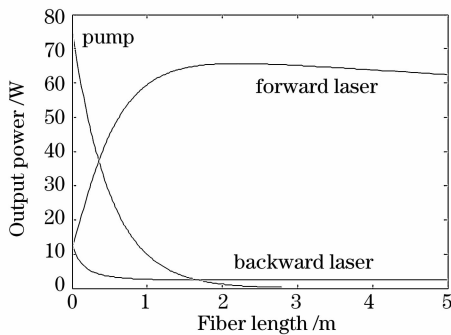


图 5 抽运功率为 75 W 时激光输出功率随光纤长度的变化

Fig. 5 Dependence of output laser power on fiber length when pump power is 75 W

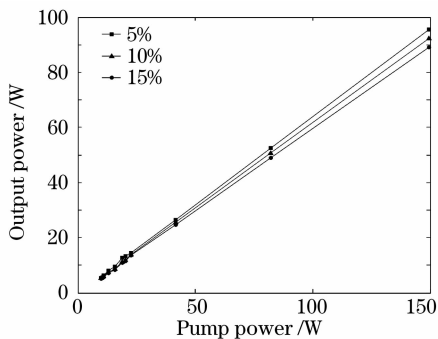


图 6 激光器  $PCF_1$  和  $PCF_2$  工作在同相模时激光输出功率随抽运功率的变化

Fig. 6 Dependence of output laser power on pump power when  $PCF_1$  and  $PCF_2$  are running in in-phase modes

## 4 结 论

利用自成像腔技术实现两个光子晶体光纤激光器的相位锁定,在无滤波器的情况下仍可测到稳定清晰的干涉图样,说明利用光子晶体光纤激光器进行光纤激光相干合成具有很大的优越性。实验还表明耦合输出镜的反射率对相干输出功率有一定影响,当耦合输出镜的反射率分别为 5%, 10% 和 15% 时,两光

子晶体光纤激光器相干输出斜率效率分别为 63.8%, 61.6% 和 60.2%。在抽运光功率为 150 W 和耦合输出镜的反射率为 5% 时,获得了 95.8 W 的相干功率输出,相干功率合成效率为 90.2%。实验的下一步工作要在进一步优化整个系统参量的基础上研究多路光子晶体光纤激光器的相位锁定技术。

## 参 考 文 献

- 1 Michel J. F. Dignonnet. *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers* [M]. Second Edition, New York: Revised and Expanded, 2001, 113~115
- 2 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[C]. *Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments*, 2005, 5709-2a
- 3 A. Carter, B. Samson, K. Tankala *et al.*. Damage mechanisms in components for fiber lasers and amplifiers[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5647**: 561~571
- 4 Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 26~29  
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 26~29
- 5 M. Wickham, J. Anderegg, S. Brosnan *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[R]. Stanford Photonics Annual Meeting, California, 2003
- 6 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 7 Christopher J. Corcoran, Frederic Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 201118
- 8 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1200~1202
- 9 Akira Shirakawa, Tomoharu Saitou, Tomoki Sekiguchi *et al.*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(21): 1167~1172
- 10 Liping Liu, Yi Zhou, Fanting Kong *et al.*. Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(21): 4837~4839
- 11 Q. Peng, Y. Zhou, Yi Chen *et al.*. Phase locking of fiber lasers by self-imaging resonator[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4): 171~172
- 12 Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 18.3 W from phase-locking double cladding fiber laser array [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 229  
楼祺洪, 何 兵, 周 军 等. 相位锁定双包层光纤激光器阵列获得 18.3 W 的相干输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 229
- 13 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158  
何 兵, 楼祺洪, 周 军 等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 14 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
- 15 Kang Li, Yishan Wang, Wei Zhao *et al.*. Lasing characteristics of strongly pumped Yb-doped photonic crystal fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 347~350