

两光纤激光器相干合成的实验研究^{*}

王建明¹⁾²⁾ 段开棕^{1)†} 王屹山¹⁾

1) 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, 西安 710119)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 12 月 10 日收到, 2008 年 2 月 25 日收到修改稿)

利用迈氏腔技术, 进行了光子晶体光纤(PCF)激光器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, 获得了功率为 47 W 的相干输出. 解释了在迈氏腔的两个输出光路上分别实现相干相长和相干相消的物理机理. 实验结果表明, 合成激光光谱较单台 PCF 激光器的激光光谱有显著的改善, 波长带宽小于 5 nm.

关键词: 光子晶体光纤, 相位锁定, 迈氏腔, 光纤激光器

PACC: 4255N, 4260

1. 引 言

近年来, 光纤激光器的输出功率不断提高, 单根双包层光纤激光器的输出功率已达到 kW 级^[1-3], 单根光子晶体光纤(PCF)激光器也已经获得 1.53 kW 的高功率输出^[4]. 但是随着输出功率的不断提高, 光纤的热光损伤以及受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)等非线性效应的影响变得很严重, 使得单根光纤激光输出功率的提高受到了很大限制. 另外, 输出功率不断提高时, 输出光束的光束质量也会变差. 为了好的光束质量和较高的输出功率, 光束合成技术是一种潜在的技术途径. 一般地, 光束合成可分为非相干合成和相干合成. 相对于非相干合成, 相干合成不仅能实现较大的峰值功率, 而且还可保证合成光束有较好的相干性和光束质量, 因此相干合成技术具有很大的研究和应用价值.

目前的相干合成技术主要有主振荡功率放大(MOPA)^[5,6]、多芯光纤自组装^[7]、全光纤相干技术^[8]、和外腔相干组束^[9-11]等. MOPA 技术属于主动调相技术, 涉及到复杂的位相探测和调制技术; 多芯光纤自组织所用光纤要求多根单模纤芯包含在共同的内包层中, 对光纤的拉制工艺技术有很高的要求; 全光纤相干技术是将多根光纤的输出激光通过光纤耦合器耦合进同一根光纤中, 其合成输出功率同样

受到单根光纤热光损伤的限制; 外腔相干组束技术比较成熟, 主要有自成像腔组束、光栅外腔组束和迈氏腔相干组束^[12]等. 迈氏腔相比其他外腔技术, 具有结构简单, 易于获得相干性较好的激光光束, 而且可有效地改善输出光束的光束质量^[12].

1999 年, Kozlov 等人报道了全光纤迈克尔逊型激光器, 并通过温度调制其中一个 FBG 的谐振波长, 观测到了注入锁定现象^[13]. 2002 年, Shirakawa 等人利用全光纤迈克尔逊型激光器, 通过应力调谐 FBG 的谐振波长, 同样观察到了相位锁定现象, 并获得 2.57 W 的输出功率^[14]. 2004 年, Sabourdy 等人报道了利用迈克尔逊干涉谐振腔对波长为 975 nm 的两路激光进行相干合成, 得到了功率较高的, 光束质量优良的激光输出^[15]. 2007 年, Fridman 等人^[16]对基于迈克尔逊干涉腔的光纤激光器做了相关的研究, 在 300 mW 输出功率范围内, 对两种谐振腔进行了比较和分析, 为优化激光器的性能提供了相关参考.

本文利用迈氏腔技术, 对两 PCF 光纤激光器进行相干合成的研究, 实现两激光光束相位锁定, 得到了激光光束质量较好的单模连续输出, 输出激光光谱带宽窄, 较单 PCF 光纤激光器的输出激光光束有了较大的改善. 同时合成激光输出功率达到 47 W, 没有明显非线性现象产生. 采用此实验装置, 利用大功率抽运源, 优化设计抽运光耦合系统, 激光输出功率还可得到进一步的提高.

^{*} 中国科学院“西部之光”联合学者项目(批准号 J0729591213)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jimmi.wang@live.cn

2. 实验装置及原理

本文中应用的实验装置如图 1 所示, LD_1 和 LD_2 为半导体抽运激光器, 其抽运光中心波长为 976 nm. C_1 和 C_2 为抽运耦合系统, 将抽运光耦合进 PCF 光纤, 实验测得它们的耦合效率为 70%. M_1 和 M_2 为两个对激光 1040—1090 nm 高反 ($R > 99.5\%$) 对抽运光高透 ($T > 95\%$) 的双色镜, 它们构成 PCF 激光器一端的腔镜. PCF_1 和 PCF_2 是长度分别为 2 m 和 4 m 的光子晶体光纤, 该光纤内包层的数值孔径为 0.62, 纤芯直径为 $40\ \mu\text{m}$, 纤芯的数值孔径为 0.03, 对 976 nm 抽运光的吸收系数为 13 dB/m, 此光纤具有单模大模场特性, 模场面积达到 $1000\ \mu\text{m}^2$, 光纤 PCF_1 和 PCF_2 的输出端面经过 8° 角抛光处理, 避免光纤端

面的 4% 菲涅尔反射对激光输出的影响. L_1 和 L_2 为非球面准直镜, 用于对 PCF_1 和 PCF_2 发出的激光进行准直. M_3 为 45° 角放置的对激光高反的 ($R > 99.5\%$) 的平面镜, 利用 M_3 全反镜改变 PCF_2 的激光光路, 使其光束与 PCF_1 光束垂直交汇在 M_4 上, 由于 M_3 的角度可方便进行微调, 优化了传统迈克尔逊干涉腔的结构, 降低了实验操作的难度^[12]. 分束镜 M_4 为 45° 放置的对激光 1040 nm 半透半反 ($R \approx 50\%$, $T \approx 50\%$) 的分束镜, 激光通过 M_4 分成互相垂直的两个分光束. PCF_1 和 PCF_2 两个激光器构成迈克尔逊干涉腔的两臂, 它们发出的激光通过 M_4 分光后相互叠加成光束 B_1 和 B_2 . M_5 为对激光部分反射 ($R = 15\%$) 的耦合输出镜, 分别与 M_1 和 M_2 构成激光谐振腔.

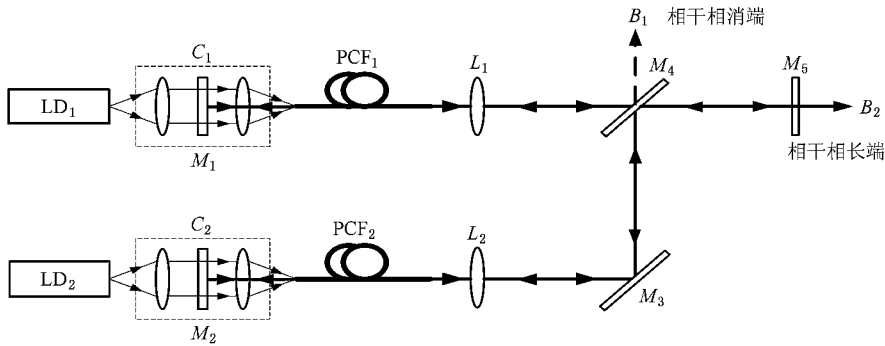


图 1 实验装置示意图

3. 实验结果与分析

反复调节实验系统, 使 M_1 , M_2 分别与 M_5 构成谐振腔, 这样在两激光器同时工作时, 由于 M_4 和 M_5 的作用, 可实现两激光器的光束的相互注入. 首先分别单独打开一个 PCF 激光器, 关闭另一激光器, 分别测量单台 PCF 激光器在 B_1 和 B_2 光路上的光束功率, 发现 B_1 和 B_2 光路上的光束功率近似相等, 这是由于 M_4 对激光半透半反造成的. 然后同时打开两台激光器, 发现在相同的抽运功率下, B_2 光路上的光束功率明显大于 B_1 光路上的光束功率, 表明两台 PCF 激光器实现了相位锁定, 两台激光器发射的光束经 M_4 分束后在 B_2 光路上获得相干相长,

而在 B_1 光路上获得相干相消. 两激光器单独工作时和两台激光器同时输出时, 在 B_2 光路上光束功率测试结果如图 2 所示, 两激光器单独工作时倾斜效率分别为 25.8% 和 22.6%. 两台激光器同时工作时, 系统倾斜效率为 31.7%, 在抽运光总功率为 148 W 时, 获得 47 W 的相干输出功率, 合成效率为 65%. 另外, 我们对 B_1 光路上的光束功率也进行了测量, 发现相消光束的最大输出功率为 17 W, 两路光束并未完全相消, 这主要是由于在 B_1 光路上的两光束功率不对称引起的, 根据干涉理论, 只有两光束光强相等时, 两路光束才能完全相消. 但实际工作时, 两 PCF 激光器输出功率在相干光路 B_1 或 B_2 上的光强不完全相等. 另外, 位相噪声、光束偏振特性等对合成效率的提高也有一定影响, 如何提高光束位相、偏振稳定性, 以提高相干合成效率, 有待做深

入地研究.

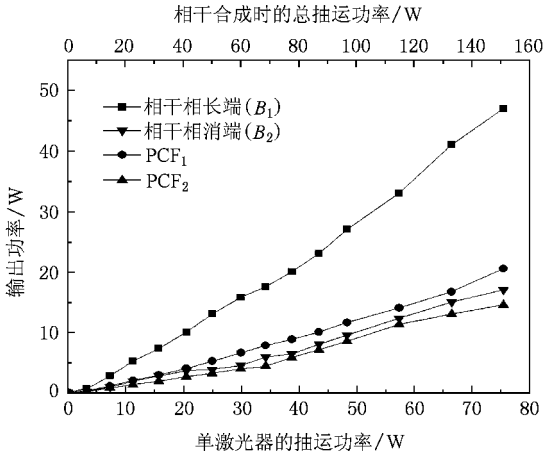


图 2 单 PCF 激光器及合成输出激光随各抽运光功率的变化

实验中两激光器的相位锁定是通过激光器的相互注入,由自组织机理实现的^[10],两台激光器经分束镜后,在 B_1 和 B_2 上分别获得相干相消和相干相长,其物理机理可详细解释如下.如图 3 为两束激光经分束镜 M_4 的光路图.1 为分束镜的镜片,折射率为 n_1 ,2 是对激光 1040 nm 半透半反膜,等效折射率为 n_2 .设空气折射率为 n_0 ,各折射率关系为 $n_1 > n_2 > n_0$.图 3 中 a 光和 b 光分别表示两 PCF 激光器发出的光束,它们在膜 2 上反射和透射, B_1 为 a 的透射光 a_1 和 b 的反射光 b_1 的叠加光束, B_2 为 a 的反射光 a_2 和 b 的透射光 b_2 的叠加光束.设 a 光和 b 光的初始相位相同, $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_0$,且光 a 和光 b 的入射角相同,膜 2 是很薄的半透半反膜,其厚度相对于基体 1 可忽略,设 a 光和 b 光在分光镜中传播的单向等效光程为 d .对 B_1 光路, a_1 的相位为 $\varphi_{a1} = \varphi_a + 2\pi n_1 d/\lambda = \varphi_0 + 2\pi n_1 d/\lambda$, b_1 的相位为 $\varphi_{b1} = \varphi_b + \pi = \varphi_0 + \pi$,则 a_1 和 b_1 的相位差 $\Delta\varphi_1 = \varphi_{a1} - \varphi_{b1} = 2\pi n_1 d/\lambda - \pi$.对 B_2 光路, a_2 的相位为 $\varphi_{a2} = \varphi_a + 2 \cdot 2\pi n_1 d/\lambda = \varphi_0 + 4\pi n_1 d/\lambda$, b_2 的相位为 $\varphi_{b2} = \varphi_b + 2\pi n_1 d/\lambda = \varphi_0 + 2\pi n_1 d/\lambda$,则 a_2 和 b_2 的相位差为 $\Delta\varphi_2 = \varphi_{a2} - \varphi_{b2} = 2\pi n_1 d/\lambda$,因此 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 相差一个 π 相位.若 $\Delta\varphi_2 = k \cdot 2\pi$ (k 为整数),即 a_2 和 b_2 的相位相同 $\varphi_{a2} = \varphi_{b2} = \varphi_0$,则 $\Delta\varphi_1 = k \cdot 2\pi - \pi$,即 a_1 和 b_1 的相位相差一个 π 相位.同理,当 a_1 和 b_1 相位相同时, a_2 和 b_2 相差一个 π 相位.当两 PCF 激光器实现相互注入时,两 PCF 激光器将由于自组织机理

进行选模,结果使满足 $\Delta\varphi = 2k\pi$ 的有限个模才能在两 PCF 激光器中产生稳定的振荡,在 B_2 上光束相干相长,在 B_1 上光束相干相消.

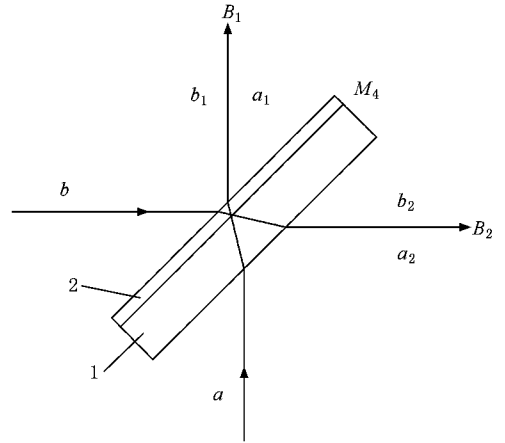


图 3 分束镜光路模型

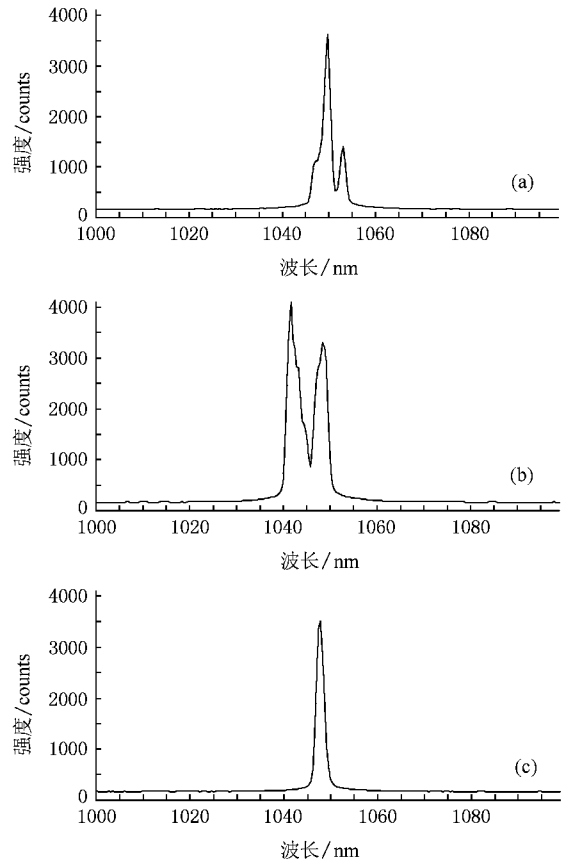


图 4 单台 PCF 光纤激光器和相干合成的激光光谱 (a)PCF₁; (b)PCF₂ (c)相干合成

我们利用美国光子公司的 GM30E-527 光谱分析仪对单台 PCF 激光器和相干合成系统输出光谱

进行了测定分析.图 4(a)为 PCF₁ 激光器的激光光谱 (b)为 PCF₂ 激光器的激光光谱 (c)为两激光器的相干合成激光光谱.可以看出,单台 PCF 激光器的波长带宽约为 10 nm,并且存在 2 个峰值,这主要是由于掺 Yb 光纤增益带宽较大引起的.当两激光器由于相互注入实现相位锁定以后,两激光器频谱成分不同的激光受到了抑制,而频谱成分相同的激光得到了放大,成为两 PCF 激光谐振腔的主要振荡模式,因而获得了谱宽较窄的激光光谱.如图 4(c)所示,相干合成激光带宽小于 5 nm,并且不受外界环境扰动的影响,随着激光功率的增加,系统能够保持稳定光谱输出.

4. 结 论

利用迈氏腔技术实现了两 PCF 激光器的相位锁定,获得了 47 W 的高功率输出,并对利用迈氏腔在两个输出光路上分别实现相干相长和相干相消物理机理进行了理论分析.实验获得了激光带宽小于 5 nm 的激光光谱,这表明,迈氏腔技术不仅能有效提高光束质量而且能有效改善输出光束的光谱特性.实验发现随着功率增加,没有不良现象产生,若对系统相关参数进一步优化,有望获得更高的输出效率,获得更高功率的激光输出.

- [1] Limpert J, Liem A, Zellmer H, Tünnermann A 2003 *Electron. Lett.* **39** 645
- [2] Jeong Y, Sahu J, Payne D, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [3] Gapont D 2005 *Laser Focus World* **41** 9
- [4] Bonati G, Voelckel H, Gabler T, Krause U, Tünnermann A, Limpert J, Liem A, Schreiber T, Nolte S, Zellmer H 2005 *Photonics West, San Jose, Late. Breaking Developments, Session 5709-2a*
- [5] Culpepper M A 2002 *SPIE* **4629** 99
- [6] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6464 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 物理学报 **55** 6464]
- [7] Bochove E J, Cheo P K, King G G 2003 *Opt. Lett.* **28** 1200
- [8] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges-Berthelemot A, Lefort L, Barthelemy A, Even P, Pureur D 2003 *Opt. Express.* **11** 87
- [9] Morel J, Woodtli A, Dandliker R 1993 *Opt Lett.* **18** 1520
- [10] Corcoran C J, Durville F 2005 *Appl Phys Lett.* **86** 201118
- [11] Chen Z L, Hou J, Zhou P, Liu L, Jiang Z F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7046 (in Chinese) [陈子伦、侯 静、周 朴、刘 亮、姜宗福 2007 物理学报 **56** 7046]
- [12] Peng Q, Sun Z, Chen Y, Guo L, Bo Y, Yang X, Xu Z 2005 *Opt. Lett.* **30** 1485
- [13] Kozlov V A, Hernandez-Cordero J, Morse T F 1999 *Opt. Lett.* **24** 1814
- [14] Shirakawa A, Saitou T, Sekiguchi T, Ueda K 2002 *Opt. Express.* **10** 1667
- [15] Sabourdy D, Desfarges-Berthelemot A, Kermene V, Barthelemy A 2004 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **10** 1033
- [16] Fridman M, Eckhouse V, Davidson N, Friesem A A 2007 *Opt. Lett.* **32** 790

Experimental study of coherent beam combining of two fiber lasers^{*}

Wang Jian-Ming^{1,2)} Duan Kai-Liang^{1)†} Wang Yi-Shan¹⁾

¹ *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics , Xi 'an Institute of Optics and Precision Mechanics ,
Chinese Academy of Sciences , Xi 'an 710119 , China)*

² *Graduate School , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)*

(Received 10 December 2007 ; revised manuscript received 25 February 2008)

Abstract

The phase-locking of two photonic crystal fiber(PCF) lasers is studied experimentally by using Michelson cavity technique , and 47 W coherent output power is obtained . The phenomenon of interference-enhancement and interference-loss on the two arms of the Michelson cavity is theoretically explained by analyzing the optical path difference . Experiment shows that the Michelson cavity setup can improve the spectra of the combined laser significantly . The bandwidth of the combined laser is less than 5 nm in our experiment .

Keywords : photonic crystal fiber , phase-locking , Michelson cavity , fiber laser

PACC : 4255N , 4260

^{*} Project supported by the Co-scholar Project of the Light in the West by the Chinese Academy of Sciences , China (Grant No.0729591213).

[†] Corresponding author. E-mail : jimi.wang@live.cn