

两光纤激光器同相锁定的实验研究

宋兴亮^{1,2}, 马冬梅³, 王倩^{1,2}, 周翊²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院光电研究院, 北京 100094;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:基于自成像共焦腔, 利用一个设计灵活的实验装置, 实现了两路掺镱光纤激光器的同相模式锁定。改变近场填充因子为 10.86%, 15.2%, 25.33% 时, 干涉条纹旁瓣数量逐渐减少, 主瓣能量占总能量比例分别为 13.58%, 18.98%, 31.42%。在 8.8 W 泵浦功率下得到 1.44 W 相干合成激光输出, 相干合成效率 93.4%。研究发现选用合适长度的增益光纤和较小反射率的外腔输出耦合镜可以提高激光斜效率, 进而增加相干合成输出功率。

关键词: 光纤激光器; 近场填充因子; 自成像共焦腔; 同相锁定; 相干合成

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.009

Experimental study on in-phase locking of two fiber lasers

SONG Xing-liang^{1,2}, MA Dong-mei³, WANG Qian^{1,2}, ZHOU Yi²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 2. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Based on self-imaging confocal resonator, in-phase locking of two Yb-doped fiber lasers has been realized using a flexible experimental setup. With near-field filling factor being 10.86%, 15.2%, 25.33%, the number of side lobes of interference fringes decreases and the energy ratios of central lobe are 13.58%, 18.98%, 31.42%, respectively. When pump power is 8.8 W, a coherent combining laser output of 1.44 W is obtained, with a power combination efficiency about 93.4%. Analytical results suggest an optimal fiber length and a smaller reflectivity of output coupler contribute to higher laser slope efficiency, which increases coherent combining output power.

Key words: fiber laser; near-field filling factor; self-imaging confocal resonator; in-phase locking; coherent combination

1 引言

光纤激光器由于其结构紧凑, 能量转换效率高, 在光通信、激光雷达、工业加工、医疗及激光武器等领域得到广泛应用。但单根光纤激光器输出功率受限于材料光损伤和热效应, 以及非线性效应。光纤激光器相干合成技术作为有效提高激光功率和亮度的方法, 成为国内外研究热点, 近年来得到了飞速发展, 比较成熟的技术路线分为主动锁相与被动锁相两大类。主动锁相的位相调节精度高, 但反馈锁相控制系统复杂昂贵^[1]。被动锁相技术具体又分为

全光纤结构^[2-3]与公共外腔结构^[4-9], 但前者仍然没有摆脱光纤材料自身的限制。

本文使用被动外腔技术中结构简单、合成效率高且易于调节的自成像共焦腔^[4], 通过一个空间滤波器选模, 实验上实现了两路光纤激光器的同相模式锁定。通过改变近场光束间距, 得到了不同光束填充因子下远场同干涉条纹能量分布, 结合

作者简介: 宋兴亮(1986-), 男, 硕士研究生, 学士学位, 主要从事光纤激光器相关技术的研究。E-mail: xingliangsong@126.com

收稿日期: 2011-04-18

理论模拟说明了其对能量分布的影响。并对影响光纤激光器及相干合成激光斜效率的因素进行了实验分析研究。最后根据所测光谱曲线,利用纵模频谱重叠模型说明了光纤激光器自身特性对合成的影响。

2 实验原理及装置

本方案的核心部分是引入的自成像共焦腔,它为各个单元激光器之间的能量相互注入耦合提供了一个外腔通道,通过在输出耦合镜平面上合适位置加入空间滤波器^[5],使只有同时满足原有光纤激光线性腔和公共外腔谐振条件的模式才具有最低的损耗而起振。本实验所选用的掺镱光纤激光器具有宽的增益带宽、长且不等的腔长以及低 Q 值特性,由其构成的激光阵列通过自成像共焦腔耦合,容易实现自动调整各个激光器工作频率和相位以形成阵列公共模^[5]。

实验装置如图 1 所示。自成像共焦腔由两个全同二向色镜 DM,一个平面输出耦合镜 OC,和一个薄透镜 Lens1 组成。DM 对 1050 ~ 1120 nm 高反面对 975 nm 透射率大于 93%,选取对 1050 ~ 1120 nm 反射率为 20% 的介质膜平面反射镜作为 OC, Lens1 的焦距为 40 cm,它在整个装置中对光场作傅里叶变换。采用两个最大功率输出为 4.4 W 的耦合尾纤输出半导体激光器作为泵浦源,其发射波长为 975 nm,尾纤芯径 105 μm 。增益介质为两根国产掺镱双包层 D 型光纤(YDDCF),内包层长、短轴直径分别为 400 μm , 350 μm ,纤芯直径 18.8 μm 。两根光纤截取于同一根光纤,光纤长度分别为 10.2 m, 8.4 m。内包层数值孔径 0.47,纤芯数值孔径为 0.1,标称的 975 nm 处小信号吸收系数为 1 dB/m。DM 紧贴光纤输入端面,利用自制 1:1 空间耦合器将泵浦光耦合进光纤,光纤输出端垂直切割具有 4% 的非涅尔反射率。两个全同平凸小透镜直径 6 mm,焦距 8 mm,作为光纤准直器 FC 置于光纤输出端。FC 关于 Lens1 镜中心轴对称放置在其前焦面上, OC 放在 Lens1 镜的后焦面上。选取宽度为 18 μm 细铂线作为空间滤波器。利用一个对 1050 ~ 1120 nm 镀高反膜的直角棱镜 90° 折转两路光纤激光,通过沿薄透镜 Lens1 光轴前后精调直角棱镜位置,以控制两路激光的光束间距 D 。薄透镜 Lens2 的焦距为 10 cm,沿中心轴放置在 OC 镜后 20 cm 处,并用位于 Lens2 后二倍其焦距平面上的红外 CCD 相机(Spiricon, LBA - SP620U)拍摄 OC 镜平面上远场干涉图样。

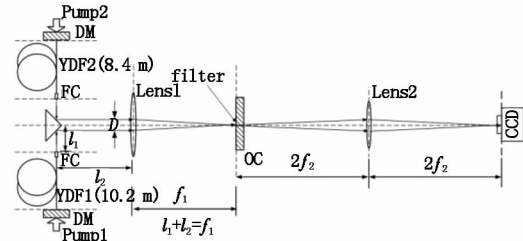


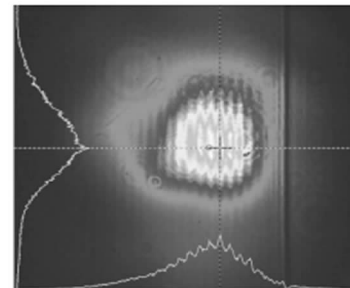
图 1 两路光纤激光器相干合成实验结构图

Fig. 1 schematic of the experimental setup for phase locking of two fiber lasers

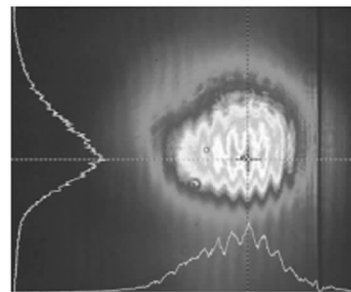
3 实验结果与分析

3.1 远场光强分布

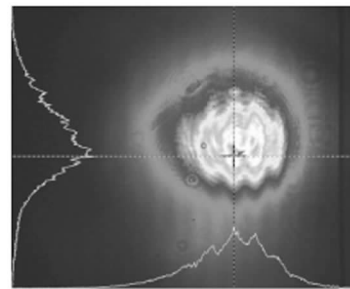
近场光束填充因子(filling factor, FF)通常定义为光束直径 d 与相邻两光束中心间距离 D 的比值,即 $FF = d/D$ 。利用图 1 所示的实验装置,首先研究了不同光束填充因子下,光纤激光阵列的远场干涉图样。当两光纤激光近场光束间距约为 7 mm, 5 mm, 3 mm 时,加入空间滤波器前后 CCD 记录的远场干涉图样分别如图 2 和图 3 所示。



(a) FF = 10.86%



(b) FF = 15.2%



(c) FF = 25.33%

图 2 能量相互注入的两路激光器自由运转时的远场图样

Fig. 2 far-field pattern of two free-running lasers when their energy are mutually injected to each other

图2为通过自成像外腔能量相互注入自由运转时的干涉图样。此时干涉条纹对比度极低,条纹不断晃动,而且外界机械扰动会加剧条纹晃动,两束激光的相位关系没有锁定。在同相(相位差为0)模式沿条纹分布方向的第一极小位置处加入细铂线滤波器后得到如图3所示干涉图样,此时条纹对比度得到极大提高,并且干涉条纹分布很稳定,施加的外界扰动结束后可以迅速恢复原状。

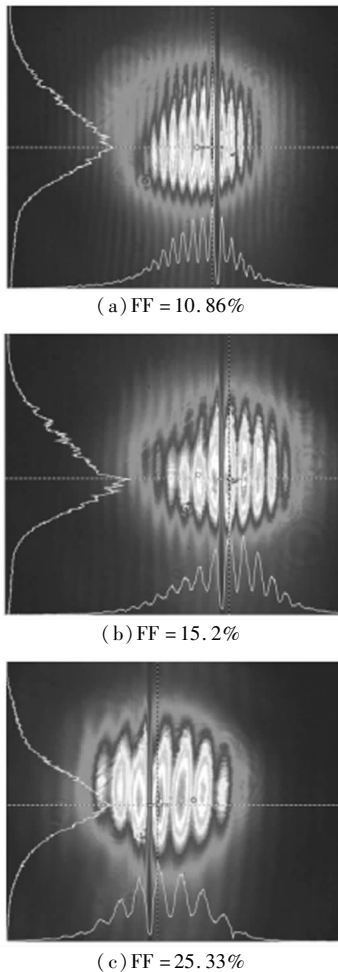


图3 同相模式第一极小位置加入空间滤波器后两路激光器合成远场图样

Fig.3 far-field pattern of two combining lasers with spatial filter placing at first intensity minimum of in-phase mode

理论上对激光光场复振幅采用基模高斯型分布模拟。假定两束激光同相锁定,其振幅相等,中心波长一致,偏振方向相互平行,且不考虑它们各自相位的随机变化,计算其在远场相干叠加形成的干涉图样。

光纤输出端面出射激光经过平凸透镜准直后,其准直输出平面上的几何光斑直径应为: $d_{100\%} = 1.6 \text{ mm}$ 。其光强分布函数的二阶矩均方根 σ 与几何光斑直径的关系为: $6\sigma \approx d_{100\%}$,则二阶矩定义的光束直径 $2\omega_0 = 2\sqrt{2}\sigma = 0.76 \text{ mm}$ 。

各激光元的光场表示为如下高斯型光束分布^[10]:

$$E_1(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left\{-i[kz - \eta(z)] - [(x - D/2)^2 + y^2] \left[\frac{1}{\omega^2(z)} + \frac{ik}{2R(z)} \right]\right\} \quad (1)$$

$$E_2(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left\{-i[kz - \eta(z)] - [(x + D/2)^2 + y^2] \left[\frac{1}{\omega^2(z)} + \frac{ik}{2R(z)} \right]\right\} \quad (2)$$

$$\eta(z) = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2 n} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{z}{f} \right) \quad (3)$$

$$f = \frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda} \quad (4)$$

$$R = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda z} \right)^2 \right] = z \left(1 + \frac{f^2}{z^2} \right) \quad (5)$$

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2 n} \right)^2 \right] = \omega_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{f^2} \right) \quad (6)$$

其中, ω_0 是平面 $z=0$ 处的束腰; $\omega(z)$ 是平面 z 处的束腰; k 是波数; R 是 z 处波前的曲率半径。

对于自成像共焦腔,假定 N 个激光元的阵列等距放置在发射平面环形上, N 倍对称性要求相邻激光元间的位相差 $\Delta\phi_m$ 为:

$$\Delta\phi_m = 2\pi m/N, \quad m \in [0, \dots, N-1] \quad (7)$$

其中, m 是模式指数。本文两路光纤激光器同相模式锁定时, $\Delta\phi_m = 0$ 。

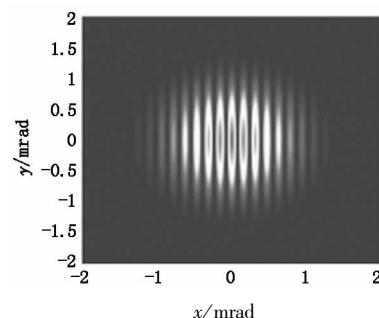
相干合成光场是各个激光元光场的线性叠加,两路光纤激光器同相锁定合成光场为:

$$E_{\text{tot}}(x, y, z) = E_1(x, y, z) + E_2(x, y, z) \quad (8)$$

其中, D 为两光束近场中心间隔。忽略常数因子,合成光强分布函数为:

$$I(x, y, z) = |E_{\text{tot}}(x, y, z)|^2 \quad (9)$$

代入本文中的各项具体参数,根据式(1)~式(9)计算得到的远场强度干涉图样如图4所示,图中 x, y 轴坐标以光场远场单位发散角(1 mrad)为单位。



(a) FF = 10.86%

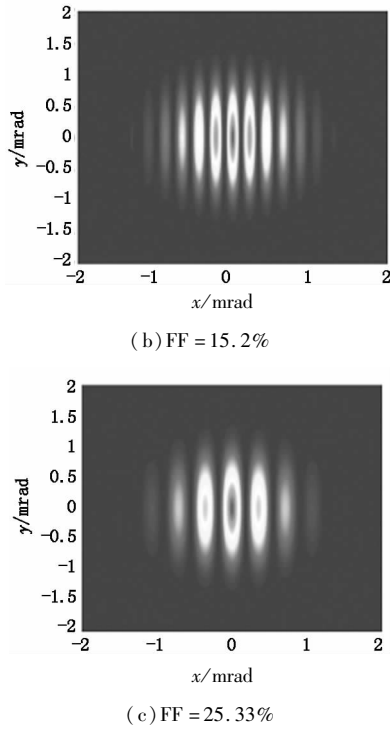


图4 模拟得到的远场同相干涉图样能量分布
Fig. 4 simulation of energy distribution of far-field in-phase interference patterns

对比图4和图3可知,理想情况下计算结果与实验得到的干涉图样轮廓几乎完全相同,说明光束的高斯近似模型能很好地指导实验。计算得到的同相模式能量分布情况如表1所示。

表1 计算得到同相模式干涉图样能量分布情况

光束中心 间距 D/mm	光束填充因子 $\text{FF}/\%$	主瓣能量 占总能量 比例/ $\%$	远场第一极小 沿条纹分布方 向位置/ mrad	薄透镜 Lens1 后焦面主瓣 宽度/ μm
7	10.86	13.58	± 0.08	64
5	15.2	18.98	± 0.11	88
3	25.33	31.42	± 0.18	144

由图2、图3,结合表1可知,近场填充因子影响激光束阵列的远场能量分布。随着填充因子增大,旁瓣的数量减少,主瓣能量增加,同时主瓣宽度也随之增大。因此尽可能提高光纤激光准直光束的近场填充因子,可以将大部分激光能量集中于主瓣,进而获得高亮度的激光束。

3.2 斜效率

两路光纤激光器各自单独运行及同相锁定合成时输出功率随注入泵浦光功率变化关系如图5所示。

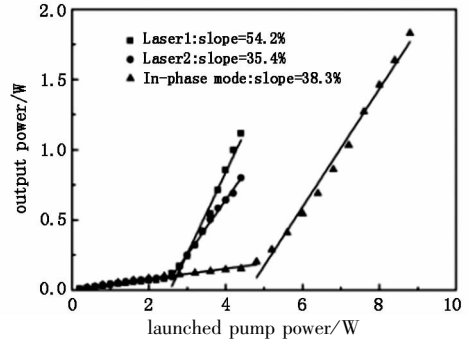


图5 输出功率随注入泵浦光功率的变化
Fig. 5 output power versus pump power for individual lasers and the in-phase locking combination

观察图5中数据变化,泵浦功率达到产生激光的泵浦阈值之前,存在线性缓慢增加的较小功率输出,这主要是没有被激活粒子 Yb^{3+} 吸收的剩余泵浦光。因为双包层光纤内包层尺寸远远大于纤芯尺寸,注入内包层的泵浦光不可避免会存在一部分以纤芯为轴的螺旋路径传播,而没有穿越纤芯被激活粒子 Yb^{3+} 吸收。通过改变内包层形状、纤芯位置及减小光纤盘绕半径,可以在一定程度上减少螺旋泵浦光。本文采用D型内包层光纤,并采取较小的盘绕半径,得到大约4%的螺旋泵浦剩余输出。两路光纤激光器各自的斜效率分别为54.2%,35.4%,同相相干合成激光斜效率为38.4%。两路光纤激光器斜效率相差18.8%,这主要是受不同增益光纤长度的影响。通过数值求解掺 Yb^{3+} 光纤激光器稳态耦合方程组,模拟得到泵浦光最大功率4.4W时,单路光纤激光器输出功率随光纤长度的变化,如图6所示。由数值模拟结果可知,光纤长度18~19m时输出功率最大(差异小于1mW),实验所用两路光纤激光器增益光纤长度10.2m,8.4m与最佳光纤长度18m相差很大,造成泵浦光转换效率低。因此,选用最佳长度的光纤可以大大提高斜效率,进一步增加相干合成输出功率。

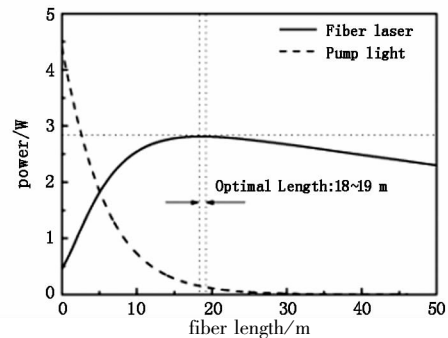


图6 注入泵浦光最大功率4.4W,模拟得到的激光与泵浦光功率随光纤长度的变化
Fig. 6 simulation of output power versus fiber length when launched pump power is 4.4 W

实验中,随着注入泵浦功率的增大,首先在复合腔外发现激光小亮斑。由实验拟合直线交点计算得到的相干合成激光阈值为 5.05 W,小于两路激光器单独运行泵浦阈值 2.49 W,2.89 W 之和,这说明相干合成复合腔的 Q 值大于单元激光器 Q 值。若将相干合成效率定义为同一泵浦功率下,合成后同相模式激光功率与合成前单元激光器单独运行时输出功率和的比值,则最大注入泵浦功率 8.8 W 下,相干合成输出激光功率为 1.44 W,相干合成效率为 93.4%。

下面研究输出耦合镜(OC)反射率对相干输出功率的影响。先后使用对 1050 ~ 1120 nm 反射率 20% ,50% ,70% 的平面镜作为输出耦合镜,实验得到如图 7 所示的输出功率随注入泵浦光功率的变化关系。

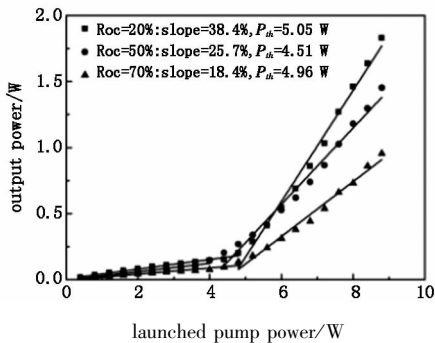


图 7 输出耦合镜(OC)反射率分别为 20% ,50% ,70% 时,相干输出功率随注入泵浦光功率的变化

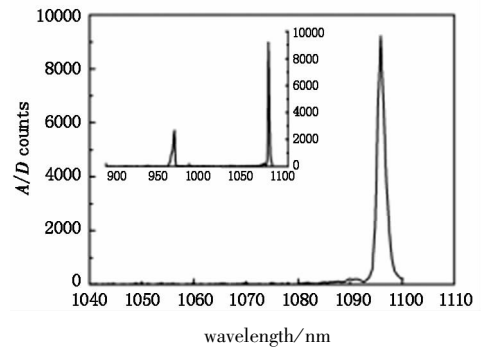
Fig.7 coherent output power versus launched pump power, when reflectivity of output coupler is 20% ,50% ,70%

输出耦合镜反射率为 20% ,50% ,70% 时,相干合成激光斜效率分别为 38.4% ,25.7% ,18.4% ,相应的阈值泵浦功率分别为 5.05 W,4.51 W,4.96 W。20% 反射率的输出耦合镜产生最高的激光斜效率,可以预见,进一步减小输出耦合镜的反射率可以得到更高的相干合成输出功率及斜效率。输出耦合镜反射率增大,输出损耗减小,但参与合成激光器之间的能量耦合损耗会增加,而两种损耗变化率的不一致导致随输出镜反射率的增加,出现泵浦阈值先减小后增加的现象。

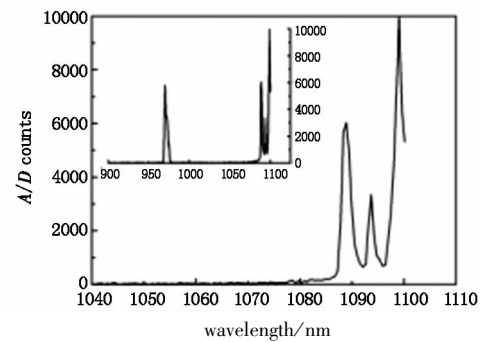
3.3 激光光谱

图 8 是用光纤光谱仪(Avantes, AvaSpec-2048FT)测得的激光光谱。当两路光纤激光器分别单独运行时,激光器 1 的峰值波长为 1095 nm,激光器 2 的光谱为多峰结构,其峰值波长分别为

1089 nm,1094 nm 及 1098 nm,这主要由掺 Yb^{3+} 光纤较大的增益带宽与沿光纤轴向的空间烧孔效应引起。此外,所测光谱中观察到 975 nm 附近的剩余泵浦光成分。受光谱仪功能所限,不能确定精确的波长带宽,但可以看出每个峰对应的波长带宽约为纳米量级,并且激光器 1 光谱重合于激光器 2 光谱之中。当腔长分别为 L_1, L_2 的两路光纤激光器相干合成运行时,公共模间隔增大为 $c/2n(L_1 - L_2)$,如图 9 所示。



(a) 激光器 1
(a) laser1



(b) 激光器 2
(b) laser2

图 8 两路光纤激光器分别单独运行的输出激光光谱
Fig.8 spectra of two individually running fiber lasers

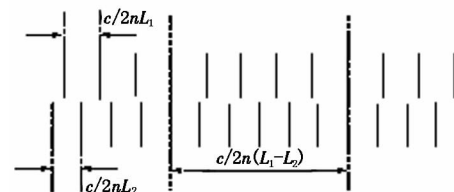


图 9 两激光器纵模频谱重叠示意图

Fig.9 schematic of longitudinal mode spectra of two lasers

若激光输出频谱宽为 $\Delta\nu$,则能够起振的纵模数 N 约为 $\Delta\nu \times 2n(L_1 - L_2)/c$,代入 $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda^2$,由下式可以估算出纵模数:

$$N \approx 2n(L_1 - L_2) \Delta\lambda/\lambda^2 \quad (10)$$

其中, n 是光纤折射率。取 $n = 1.5, \Delta\lambda = 1 \text{ nm}$,

$\lambda = 1095 \text{ nm}$, $L_1 - L_2 = 1.8 \text{ m}$, 得到纵模数约为 4.5 万。本文两路激光器相干输出时相应可起振的公共纵模数应减少,但仍存在大量公共纵模,这使得合成阵列允许加入更多的激光单元,说明采用掺镱光纤激光器阵列进行相干合成的扩展潜力很大。

由式(9)可知,增益介质长度差($L_1 - L_2$)与光谱重叠带宽 $\Delta\lambda$ 大小决定输出激光纵模数,参与合成的单元激光器增益介质长度差越大,光谱重叠带宽越宽,更容易实现相干合成输出。

4 结 论

实现了基于自成像共焦腔的两路光纤激光器同相锁定,在不同近场光束填充因子下观察到了稳定且条纹对比度高的远场干涉条纹。利用高斯光束模型理论计算了远场干涉图样,发现增大近场光束填充因子可以减少旁瓣数量,提高主瓣能量,以获得更高亮度的激光。8.8 W 泵浦功率下,获得 1.44 W 相干激光输出,合成效率 93.4%。若选用最佳长度的光纤,减小复合腔耦合输出镜反射率可以增大激光斜效率,可以进一步提高相干合成激光功率。最后通过研究两路光纤激光器光谱特性,得出激光增益介质长度差越大,光谱重叠带宽越宽,则复合腔中存在更多公共纵模,相干合成也更容易实现。

参考文献:

- [1] Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung, et al. Coherently coupled high power fiber array[J]. SPIE, 2006, 6102:1-5.
- [2] Akira Shirakawa, Tomoharu Saitou, Tomoki Sekiguchi, et al. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. Optics Express, 2002, 10(9) No. 21: 1167-1172.
- [3] Bing Lei, Ying Feng. Phase locking of an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop[J]. Optics Express, 2007, 15(25): 17114-17119.
- [4] Jin Ruonan, Xu Zichao, Song Xingliang, et al. Calculation of coherent combination based on self-imaging confocal resonator[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3154-3159. (in Chinese)
金若男,徐子超,宋兴亮,等.自成像共焦腔相干合成空间滤波器设计[J].光子学报,2009,38(12): 3154-3159.
- [5] Liping Liu, Yi Zhou, Fanting Kong, et al. Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(21): 4837-4839.
- [6] Q Peng, Y Zhou, Y Chen, et al. Phase locking of fibre lasers by self-imaging resonator[J]. Electronics Letter, 2005, 41(4): 171-173.
- [7] Xu ZiChao, Song Xingliang, Zhou Yi. Coherent combination of one-dimensional fiber laser array by self-imaging confocal resonator[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2011, 28(3). (in Chinese)
徐子超,宋兴亮,周翊.自成像共焦腔一维光纤激光器阵列相干合成的实验研究[J].量子电子学报,2011, 28(3).
- [8] M Wraage, P Glas, D Fischer, et al. Phase locking in a multicore fiber laser by means of a talbot resonator[J]. Optics Letters, 2000, 25(19): 1436-1438.
- [9] C J Corcoran, F Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-fourier cavity[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(20): 201118-201118-3.
- [10] Yu Kuanxin, Jiang Tieliang, Zhao Qida. Principle of laser and laser technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1998: 210. (in Chinese)
俞宽新,江铁良,赵启大.激光原理与激光技术[M].北京:北京工业大学出版社,1998: 210.