

基于 3-dB 光纤耦合器的级联式光纤激光相干合成方法研究

杨 燕^{1,2,3} 耿 超^{1,2} 李 枫^{1,2,3} 李新阳^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于 3-dB 光纤耦合器的级联式激光相干合成新方法。理论分析了基于 3-dB 耦合器的两单元相干合成模块的工作原理, 仿真分析了光强失配及相位失配对相干合成效率的影响; 搭建了基于随机并行梯度下降优化算法的相位控制平台, 实验验证了两单元模块的可行性。实验结果表明, 闭环后归一化合成光强的平均值从 0.50 提升至 0.92, 均方误差从 9.27% 下降至 0.062%, 而实现两单元模块输入端相位锁定和光强匹配是获取高效、高稳定相干合成效果的关键。最后, 基于两单元模块提出了可拓展的级联式激光相干合成结构, 并以八单元为例进行了相干合成的仿真。

关键词 光纤光学; 相干合成; 3-dB 光纤耦合器; 相位控制

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s106005

Research of Cascaded Coherent Combining of Fiber Lasers Based on 3-dB Fiber Couplers

Yang Yan^{1,2,3} Geng Chao^{1,2} Li Feng^{1,2,3} Li Xinyang^{1,2}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A new method of cascaded coherent combining of fiber lasers based on 3-dB fiber couplers is proposed. The theoretical model of two-unit coherent combining module based on 3-dB fiber coupler is analyzed, and the effects of light intensity and phase mismatch on coherent combining efficiency are studied. The phase-control setup using stochastic-parallel-gradient-descent algorithm is established to investigate the feasibility of the two-unit coherent combining module. As the experimental results show, the average value of the normalized combined intensity increases from 0.50 in open loop to 0.92 in closed loop, the mean square error decreases from 9.27% to 0.062%, and the phase locking and intensity matching are crucial to achieve high and stable effect of the coherent combining. Additionally, an extended cascaded structure of coherent combining of fiber lasers based on two-unit coherent combining module is presented and the simulation of eight-unit structure is performed.

Key words fiber optics; coherent combining; 3-dB fiber coupler; phase control

OCIS codes 060.2310; 0140.3298; 010.1080; 140.3290

1 引 言

光纤激光器具有光束质量好、电光效率高、结构紧凑、激光柔性输出等优点, 在工业、民用和国防等领域有着广阔的应用前景。受限于非线性效应、模式不稳定和热损伤等物理机制, 在提高单根光纤输出功率的同时保持光束质量十分困难^[1-2]。光纤激光阵列的相干合成是实现高功率密度、高光束质量激光输出的有效

收稿日期: 2015-03-25; **收到修改稿日期:** 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61205069, 61138007)

作者简介: 杨 燕(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光相干合成等方面的研究。E-mail: cloveryang@whu.edu.cn

导师简介: 李新阳(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

(通信联系人)

途径之一,在国内外引起了广泛的关注^[3-4]。目前,已被提出和研究的光纤激光相干合成方法主要有:主振荡功率放大(MOPA)结构光纤激光阵列锁相^[5-7]、多芯光纤倏逝波耦合锁相^[8-9]、Talbot 自成像的多芯光纤锁相^[10]、自傅里叶腔的光纤阵列锁相^[11-12]、光纤激光阵列的相干性自组织^[13]、相干偏振合成^[14-15]等。

采用全光纤结构的合成方案是光纤激光相干合成的发展趋势之一,该方案具有结构紧凑、稳定性好、易于模块化等优点^[16]。其中,如何利用光波导器件实现多路激光的相干合束是最核心的问题。2014年,国防科技大学的杨保来等^[17]利用多模光纤合束器搭建了基于主动锁相的四路光纤激光相干合成实验装置,实现了400 mW功率的输出。该实验验证了采用多模光纤合束器进行相干合成的有效性,但并未对光束质量更好的单模情况及激光偏振情况进行讨论;关于此种方案向多链路扩展及向大功率发展的可行性还需进一步的研究。

本文将提出一种基于2×2端口3-dB光纤耦合器的光纤激光相干合成新方法,具有结构简单新颖、易于拓展等特点。介绍了基于3-dB光纤耦合器的两单元激光相干合成模块的工作原理,并进行合成效率的理论及仿真分析;搭建了基于随机并行梯度下降(SPGD)优化算法的相位控制平台,实验验证两单元模块的可行性;基于两单元模块提出可拓展的级联式激光相干合成结构,并以八单元为例进行相干合成仿真研究。本文的研究成果有望率先应用于对光功率要求不高的空间光通信领域,实现对空间光的高效合成与接收。

2 两单元相干合成模块的工作原理

光纤耦合器是一种具有分光和合光作用的无源器件^[18]。作为一种全光纤器件,光纤耦合器具有与传输光纤容易连接且损耗较低、不存在任何反射端面引起的回波损耗等优点。2×2光纤耦合器是最基本的耦合单元,其他的光纤耦合器都可以由其级联而成。其中,3-dB光纤耦合器的特点是对于在工作波长的激光,光耦合器的输入信号可以在输出端之间平均分配。

图1为基于3-dB保偏光纤耦合器的两单元激光相干合成模块示意图。激光源发出波长为1064 nm的线偏振光,经保偏光纤分束器后分为两束相干光,第一路光经光纤衰减器对其光强进行衰减调节后连接到3-dB耦合器的输入端口1(input port-1),第二路经保偏光纤相位调制器(PM)传输后连接到输入端口2(input port-2)。两路激光束到达3-dB耦合器时的光强分别为 I_{01} 和 I_{02} ,相位分别表示为 φ_1 和 φ_2 。两束光在3-dB光纤耦合器处会合并相互耦合,然后分别从输出端口1(output port-1)和输出端口2(output port-2)输出。此处定义输出端口1为合成端、输出端口2为探测端。光电探测器(PD)位于探测端末端,用于探测此路输出的光能量 I_2 ,并将探测到的光能量作为性能指标输送至控制器,控制器采用优化控制算法产生控制信号,驱动PM实现对两束输入光之间相位差的控制。相位调制器闭环工作,使得性能指标 I_2 最小,则此时输出端光能量 I_1 将达到最大值。

2×2端口3-dB光纤耦合器的传输矩阵^[19]为

$$M_{3\text{-dB}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2×1 coherent combining module

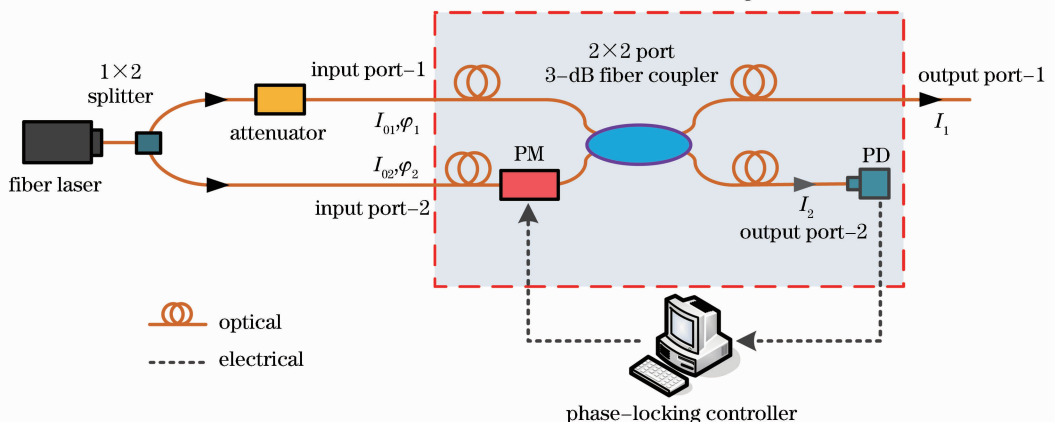


图1 基于3-dB光纤耦合器的两单元激光相干合成模块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-unit coherent combining module based on 3-dB fiber coupler

两路输入相干光之间的相位差 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, 可用矩阵表示为

$$\mathbf{M}_{\Delta\varphi} = \begin{bmatrix} \exp\left(j\frac{\Delta\varphi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-j\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2×2 光纤耦合器输入、输出端口的电场分别用琼斯矩阵 $\begin{bmatrix} E_{01} \\ E_{02} \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}$ 来描述, 其转换关系表示为

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{3\text{-dB}} \mathbf{M}_{\Delta\varphi} \begin{bmatrix} E_{01} \\ E_{02} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由(1)~(3)式可以得到

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[E_{01} \cdot \exp\left(j\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + E_{02} \cdot \exp\left(-j\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right], \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[E_{01} \cdot \exp\left(j\frac{\Delta\varphi}{2}\right) - E_{02} \cdot \exp\left(-j\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right]. \quad (5)$$

因此, 经过 3-dB 光纤耦合器后, 两个输出端口的光强分别为

$$I_1 = |E_1|^2 = \frac{1}{2} \left[E_{01}^2 + E_{02}^2 - 2E_{01}E_{02} \cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (6)$$

$$I_2 = |E_2|^2 = \frac{1}{2} \left[E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right]. \quad (7)$$

由(6)、(7)式可知, 当两输入端的光强值相等时, 若输入端的相位差 $\Delta\varphi = \pi/2 + k \times 2\pi$ (k 为整数), 则激光全部由合成端口输出, 这里称之为相位锁定条件; 若输入端相位差 $\Delta\varphi = -\pi/2 + k \times 2\pi$ (k 为整数), 则激光全部由探测端口输出; 其他情况下, 两个输出端口均有激光输出。由(6)、(7)式相加可知, 两输出端口的光强之和等于两输入端口的光强之和。

定义合成效率为合成端输出光强与总输入光强的比值, 则单元合成效率 η 为

$$\eta = I_1 / (I_{01} + I_{02}). \quad (8)$$

据此, 对基于 3-dB 光纤耦合器的两单元激光相干合成进行仿真分析。对输入总光强值做归一化处理, 则此时合成端的光强值 I_1 在数值上等效于合成效率。图 2 为两输出光强 I_1 和 I_2 随两输入端之间相位差 $\Delta\varphi$ 的变化曲线, 此处假定两输入光强值相等。图 3 为 I_1 和 I_2 随两输入端光强值之比 (I_{01}/I_{02}) 的变化曲线, 此处假定两输入端的相位差恒定为 $\pi/2$ 。

由图 2、图 3 可知, 当两输入端光强值相等时, 控制两输入端之间相位差使其满足相位锁定条件, 此时合成效率可达 100%; 而当两输入端光强值不相等时, 在满足相位锁定条件下, 随着两输入光强失配程度的增加, 合成效率随之减小, 当两输入光强值之比为 4 时, 合成效率降低至 90%。可见, 两单元模块输入端的相

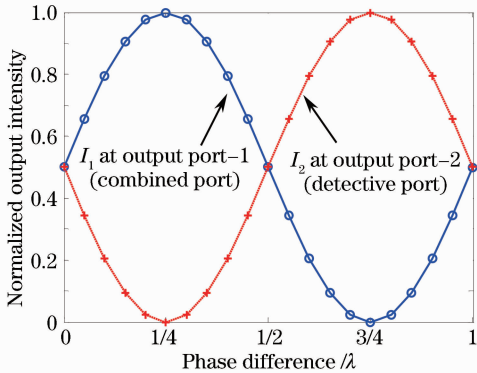


图 2 两输出光强值随相位差的变化曲线

Fig. 2 Curves of the normalized output intensity as the function of the phase difference

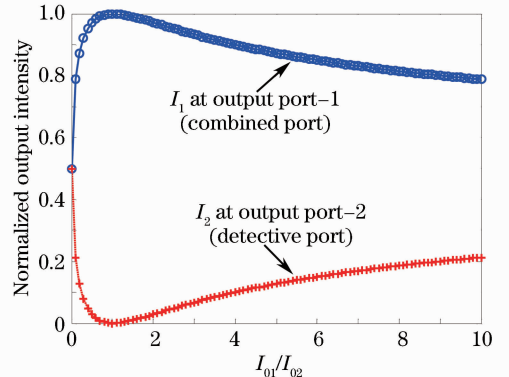


图 3 两输出光强值随输入光强值之比的变化曲线

Fig. 3 Curves of the normalized output intensity as the function of the ratio of I_{01} and I_{02}

位锁定和光强匹配是实现高效、高稳定合成效率的关键。

3 两单元相干合成模块的实验研究

根据上述原理及相关分析,开展了基于 3-dB 光纤耦合器的两路激光相干合成实验研究。具体实验方案如图 1 所示,所用激光器(上海瀚宇,型号:VLSP-1064-B-SF-200)的中心波长为 1064.48 nm,功率为 200 mW,线宽约 1 MHz,相干长度约为 300 m;衰减器对其中一路激光能量进行衰减,以实现两路合成子光束光强比的控制;实验采用全保偏光纤光路。实验中以 PD 实时探测到的光强电压信号作为控制回路的性能指标,采用负向收敛的 SPGD 迭代算法得到相位控制信号。控制电压作用于 PM 以补偿子光束间的相位差,使两输入光束间的相位差向相位锁定方向收敛。在系统闭环时,探测端光强值达到最小,合成端光强值则最大,从而实现两路光束的相干合成。

首先进行了动态相位扰动的校正实验。开环与闭环条件下各进行 2.5 s 实验得到合成端光强 I_1 及探测端光强 I_2 值,并分别对其进行归一化处理,得到归一化光强,结果如图 4 所示结果。由图 4(a)可知,基于 3-dB 光纤耦合器的两路激光相干合成实验中,对相位差进行闭环控制,可有效降低探测端光强值;由图 4(b)可知,开环时,归一化合成光强的平均值为 0.50,均方误差(MSE)为 9.27%,说明光纤相位漂移使相干合成效果明显变差;闭环时,2.5 s 实验内归一化合成光强的平均值为 0.92,较开环时大大提高,MSE 降低至 0.062%,相干合成的效果和稳定性得到极大提升。因此,对两输入光束之间的相位差进行控制,可以使经过 3-dB 光纤耦合器进行相干合成后的光强从其中一路输出端输出,实验结果与第二节中的理论分析结果相吻合。值得注意的是,通过使用输出更稳定的激光器、高精度的可调衰减器以及进一步的优化控制电路及算法等手段,可以进一步提高相干合成的效果。

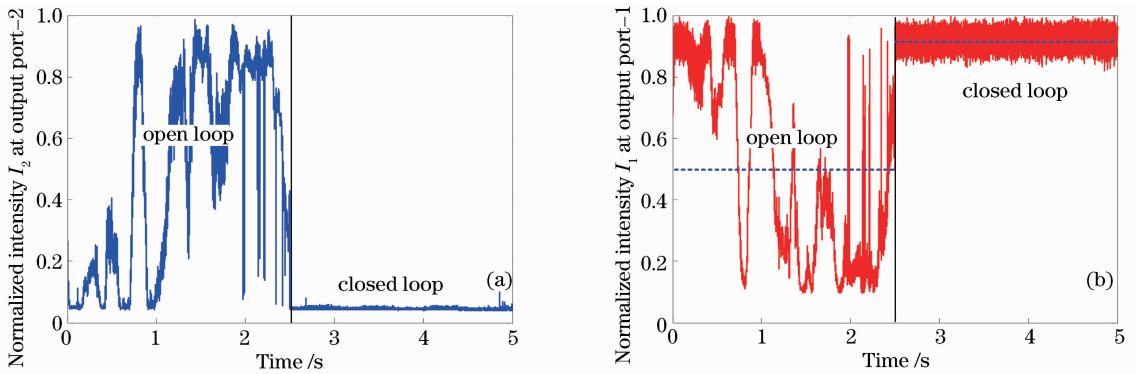


图 4 系统开环和闭环状态下的输出光强。(a)探测端;(b)合成端

Fig. 4 Normalized output intensities of the system in open-loop and closed-loop. (a) Detective port; (b) combined port

实验同时验证了两输入光强值之比对相干合成效果的影响。定义输出损耗为相干合成探测端光强与两输出端光强之和的比值。通过改变其中一路输入光的光强值来改变两输入光强的比值,并进行相位闭环控

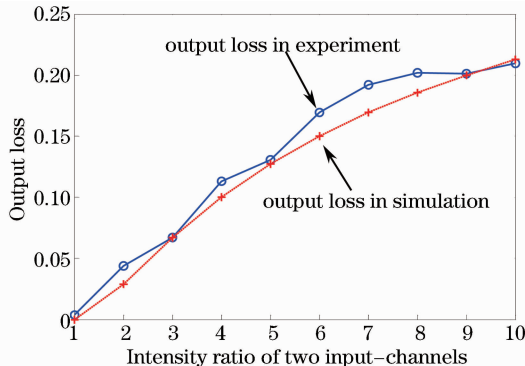


图 5 输出损耗随两输入光强值之比的变化曲线

Fig. 5 Curves of output loss as the function of the ratio of the input intensities

制,探测和计算不同输入光强之比时的输出损耗,得到输出损耗随两输入光强值之比的变化曲线,如图 5 所示。图中虚线为理论值曲线,实线是实验测得的关系曲线。两条曲线的规律一致,考虑到实验误差的影响,两条曲线基本吻合。该实验结果验证了光强失配造成相干合成效果下降的结论。

4 可拓展的级联式相干合成结构及仿真

图 6 为基于两单元模块的级联式激光相干合成结构示意图。图中 $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N}$ 表示第一级合成中各路输入端光强, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ 表示相应的光相位。在每一级合成中,成对的两光束通过图 1 所示 2×1 相干合成模块(CCM)进行光束合成,合成光束再输入到下一级中进行合成,直至所有输入光束全部完成相干合成。由于最大的合成效率需满足输入两光强的匹配,应使第一级每一路的输入光强尽量接近。在此级联结构中,每一个相干合成模块均具有独立的相位控制系统,完成此单元的高效高稳定相干合成,进而可实现多单元的高效相干合成。

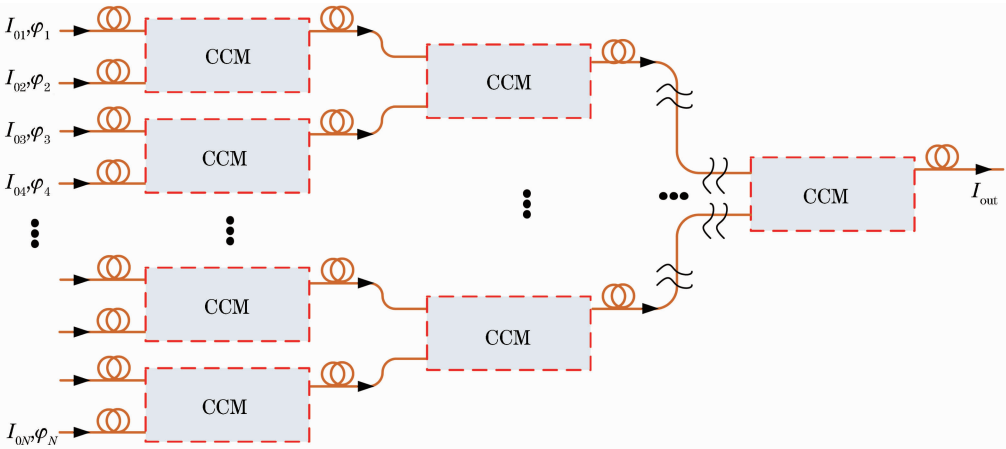


图 6 基于两单元相干合成模块的级联式相干合成结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the cascaded structure of coherent combining based on two-unit CCM modules

以八路相干合成为例,对基于 3-dB 耦合器的级联式激光相干合成方案进行了数值仿真研究。该仿真中假定八路子光束输入光强值相等。在每路子光束中引入随机相位差,开环时不进行校正;闭环时使用 SPGD 迭代算法进行控制,且相位噪声每改变一次,SPGD 迭代 30 次。仿真结果如图 7 所示。开环时,100 次仿真的合成效率平均值为 0.12, MSE 为 6.61%;闭环时,100 次仿真的合成效率平均值为 0.99, MSE 为 0.13%。仿真结果说明,在多单元相干合成过程中,采用 SPGD 算法对各输入端之间相位差进行补偿,也可在有效提升合成效率同时,提高相干合成的稳定性。

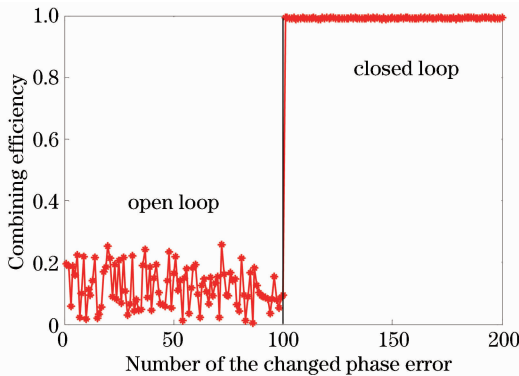


图 7 八单元相干合成时,合成效率随相位噪声改变次数的迭代曲线

Fig. 7 Evolution curve of combining efficiency as the function of the number of the changed phase error for eight-unit coherent combining module

5 结 论

证明了基于 3-dB 光纤耦合器的级联式激光相干合成方法的可行性。对基于 3-dB 光纤耦合器的两单元相干合成模块进行理论分析,从仿真结果可看出两输入端激光束的相位差和光强比是影响合成效率的关键因素。搭建了基于 SPGD 算法的两单元模块相位控制平台,实验结果表明:通过对输入两端激光束相位差的控制,闭环时归一化合成光强的平均值从 0.50 提高到 0.92,均方误差从 9.27% 下降到 0.062%,有效抑制了光纤相位漂移等因素的不利影响,在合成端实现了高效、高稳定的相干合成输出;在相位锁定的条件下,随着光强值失配,损耗增大,输入光强比为 1 时,输出损耗为 0.33%,输入光强比为 10 时,输出损耗为 20.95%,与理论仿真结果基本吻合。最后拓展为多单元级联式激光相干合成结构,并以八单元为例进行了仿真。

参 考 文 献

- 1 J W Dawso, J M Messerly, R 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.
- 2 Y Jeong, J Nilsson, J K Sahu, *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 546–551.
- 3 G D Goodno, H Komine, S J McNaught, *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab laser[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9): 1247–1249.
- 4 T M Shay, V Benham, J T Bakert, *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. *J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 460–472.
- 5 C J Corcoran, S Brosnan, E Cheung, *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, 6102: 61020U.
- 6 C Geng, X Li, X Zhang, *et al.*. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(24): 5531–5536.
- 7 C Geng, W Luo, Y Tan, *et al.*. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. *Opt Express*, 2013, 21(21): 25045–25055.
- 8 Y Huo, P K Cheo. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, 22(11): 2345–2349.
- 9 Yan Aimin, Liu Liren, Liu De'an, *et al.*. Recent progress in phase-locking and aperture filling of fiber laser arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(8): 33–39.
闫爱民,刘立人,刘德安,等. 光纤激光阵列锁相和孔径装填技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(8): 33–39.
- 10 M Wrage, P Glas, M Leitner. Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structured mirrors[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(13): 908–982.
- 11 C J Corcoran, F Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(20): 201118.
- 12 E J Bochove, C J Corcoean. In-phase supermode selection in a multicore fiber laser array by means of a self-Fourier external cavity[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(22): 5009–5018.
- 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 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.
- 15 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.
- 16 Yang Baolai, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.*. Research of all-fiber laser coherent combining system based on fiber-loop[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1005001.
杨保来,王小林,周 朴,等. 全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1005001.
- 17 Baolai Yang, Xiaolin Wang, Pengfei Ma, *et al.*. Active phase locking of four Yb-doped fiber amplifiers with a multi-mode fiber combiner[J]. *Fiber-Based Technologies and Applications (FBTA)*, 2014: JFZA. 6.
- 18 Chi Zeying, Chen Wenjian, Li Wusen. *Fiber Optics, Theories and Applications, Second Edition*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 155–162.
迟泽英,陈文建,李武森. *光纤光学与光纤应用技术(第二版)*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 155–162.
- 19 Ji Jiarong, Feng Ying. *Higher Optics Course*[M]. Beijing: Publishing House of Science, 2009: 478–482.
季家镛,冯 莹. *高等光学教程*[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 478–482.