基于迈克尔逊腔光纤激光相干合成的输出特性

王 倩[1,2],宋兴亮[1],刘广义[1],范元媛[1],崔惠绒[1],鲍 洋[1],周 翊[1]

(1. 中国科学院光电研究院,北京 100094; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:基于自组织相干合成原理,利用迈克耳逊腔开展了光纤激光阵列相干合成的原理实验研究,实现了掺 Yb^{3+}双包层光纤激光阵列的相位锁定。根据其原理,合理解释了相应的物理现象以及迈克尔逊腔相比于其他腔型的优势。重点理论模拟并实验验证了准直透镜设计、耦合输出镜反射率、两路泵浦功率平衡等关键因素对迈克尔逊腔相干激光输出功率的影响,为优化迈克尔逊腔、提高最终输出功率、抑制相干相消端的功率泄漏在一定程度上提供了理论依据。

关键词:相干合成; 迈克耳逊腔; 输出功率; 光纤光学

中图分类号:TN248.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)01-0073-06

Output of coherent combining of fiber laser in Michelson cavity

Wang Qian[1,2], Song Xingliang[1], Liu Guangyi[1], Fan Yuanyuan[1], Cui Huirong[1], Bao Yang[1], Zhou Yi[1]

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the principle of self-organization, coherent combining of two fiber lasers in Michelson cavity was demonstrated experimentally. According to this principle, the corresponding physical phenomena and advantages of Michelson cavity were reasonably explained. Some key factors affecting output powers in Michelson cavity, such as design of collimating lens, reflectivity of output coupler, and the balance of two pump power, were discussed both in theory and experiment. It provides a theoretical basis for optimization of Michelson cavity, improvement of the final output power and suppression of the power leakage in destructive channel.

Key words: coherent combining; Michelson cavity; output power; fiber optics

收稿日期:2012-05-05; **修订日期**:2012-06-03

基金项目:企业委托项目(Y1804A01N)

作者简介:王倩(1987-),女,硕士生,主要从事激光技术方面的研究。Email:wangxiaoqian0601@163.com

导师简介:周翊(1970-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事激光技术方面的研究。Email:zhouyi@aoe.ac.cn

0 引 言

光纤激光器具有结构简单、散热优良、转换效率高等优点,很容易实现高功率、高亮度、高光束质量的激光输出,是激光技术领域中的一大研究热点。近年来,单根光纤激光器的输出功率有了很大的提高,但是由于受到非线性效应、光纤端面损伤阈值等因素的影响,单纤激光功率的进一步提高遇到了巨大挑战。

通过某些技术手段,将多个激光器的输出光束叠加起来,可以得到高功率的激光输出[1],这主要包括相干合成和非相干合成。与非相干合成相比,相干合成的优势在于保持光束质量的前提下,获得了高功率激光输出,大大提高了激光亮度[2-3]。相干合成的方法主要分为两类:一类是主动相位控制的相干合成[4],另一类是被动相干合成。被动相干合成主要包括泰伯腔耦合[5]、自成像共焦腔耦合[6]、相位光栅耦合[7]、全光纤耦合[8]以及迈克尔逊腔耦合[9-10]等。其中,主动相位控制相干合成需要复杂的电路伺服系统;被动相干合成中的泰伯腔耦合在模式控制和对准上有很大的困难;全光纤耦合并没有突破单根光纤端面损伤阈值的限制;自成像共焦腔耦合输出的光斑存在旁瓣,光能很难集中利用;而在迈克尔逊腔中,光束在空间耦合,输出光斑为单斑,光能集中,便于利用,可见迈克尔逊腔耦合有望成为最具前景的被动相干合成方式之一。

1999 年,Kazlov 等首次报道了全光纤型 Michelson 腔型光纤激光器,并通过温度调制其中一个布拉格光栅的谐振波长,观测了注入锁定现象[11]。2004 年,D.Sabourdy 等人成功实现了两路全光纤结构的相干合成,得到了光束质量优良的光束输出[8]。2007 年,Moti Fridman 等人实现了两路光纤的腔内、腔外迈克尔逊相干合成,并对两种腔型做了细致的分析,为提高相干合成效率以及最终输出功率提供了一定的参考依据[10]。国内方面,2008 年中科院理化研究所彭钦军等人首次实现了两路 Nd:YVO_4 固体激光的迈克尔逊腔相干合成,获得了功率超过 2 W,M^2 接近 1 的光束输出[12]。在这些已有报道中,大多数通过测量相干合成输出激光的功率、光场以及频率来研究合成效果,并通过增益方程以及循环场理论来解释功率输出特性和频谱特性,但是对影响相干合成最终输出功率的因素讨论和报道较少。

文中利用迈克尔逊腔,开展了光纤激光阵列相干合成的实验研究,成功实现了基于迈克尔逊腔光纤激光阵列的相干合成,根据增益方程理论重点讨论了影响相干光束输出功率的几个关键因素,实验结果符合理论分析。

1 实验装置与原理

基于迈克尔逊腔光纤激光相干合成实验装置如图1所示,LD1 和 LD2 是两台带尾纤的半导体激光泵浦源,其中心波长为 975 nm,尾纤芯径为 125 μm,NA 为 0.15。泵浦光通过二向色镜 M_1、M_2(HT@975 nm,HR@1 064 nm)耦合到 D 型双包层光纤中,光纤的输出端经过端面磨平后具有 4%的反射率。实验中采用的 D 型双包层光纤为武汉烽火公司生产的掺 Yb^{3+}双包层 D 型(350/400 μm)光纤。内包层数值孔径 0.46,纤芯直径 18.8 μm,NA 为 0.1,对 976 nm 的吸收系数为 1.0 dB/m,两光纤长度均为 10 m 左右。两路输出激光经过直径为 10 mm、焦距 f 为 12 mm 的平凸透镜 L_1、L_2(未对 1 064 nm 镀膜)准直后,入射到 50/50 分束器BS(Beam Splitter)上。精细调节两路光束和分束器间的角度,使得两路光束通过分束器后相互重叠。Mo 平镜作为迈克尔逊腔后腔输出镜(**R**=20%@900 nm~1 200 nm)。

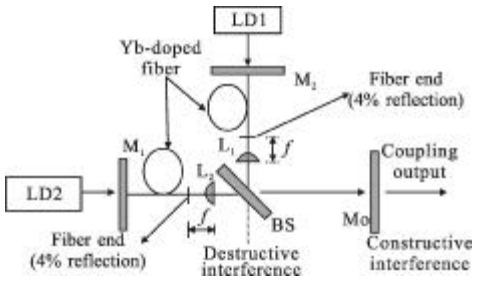


图 1 基于迈克尔逊腔光纤激光相干合成实验装置图

Fig.1 Experimental setup of two fiber laser coherent combining in Michelson cavity

在基于迈克尔逊腔的相干合成装置中,两路光束在分束器处发生相干叠加,在分束器的上下两个表面分别发生干涉相长和干涉相消。在分束器具有输出耦合镜的一侧可以对激光形成反馈,该方向上的激光振荡可以持续进行,而在分束器没有输出耦合镜反馈的一侧不能形成激光振荡。同时,由于光耦

合的作用，两个单元激光器存在一定的相互注入自组织效应，这使得单元激光器的频率和相位发生自动调节，激光阵列耦合腔的公共模作为最低损耗的模式首先被激发，相位差满足 $2n\pi$ 的有限个模式形成稳定振荡,从而保证耦合输出端输出功率最大,而相干相消端输出功率最小，即不同干涉臂的光束经过分束器后在低损耗的一侧发生相长干涉，在高损耗一侧发生相消干涉。

2　实验结果与讨论

反复调节实验装置，使 M_1、M_2 分别与 Mo 构成谐振腔，在两激光器同时工作时，由于 BS 的作用，可实现两激光光束的相互注入。维持泵浦光功率在单路激光阈值之下，当只有一台半导体激光泵浦源工作时,在耦合输出镜 Mo 后没有发现激光振荡;当两台半导体激光泵浦源同时工作时，在 Mo 后有激光输出,移去 Mo 后激光消失。由此证明,M_1、M_2 与 Mo 共同构成了迈克尔逊耦合腔,两路光束实现了相干合成。

由于两束激光在分束器后彼此重叠,成为一束光输出,输出孔径完全填充,即光束填充因子为 1,因此输出光斑为单一光斑,如图 2(c)所示。与单路光斑相比(图 2(a)、(b)),迈克尔逊腔相干合成输出光斑尺寸没有明显增大,但是光强有了明显提高,因此激光亮度大大提高。与目前广泛研究的典型自成像共焦腔(输出光斑如图 2(d)所示)等其他腔型相比,迈克尔逊腔输出光斑无旁瓣影响,能量更为集中,便于利用。

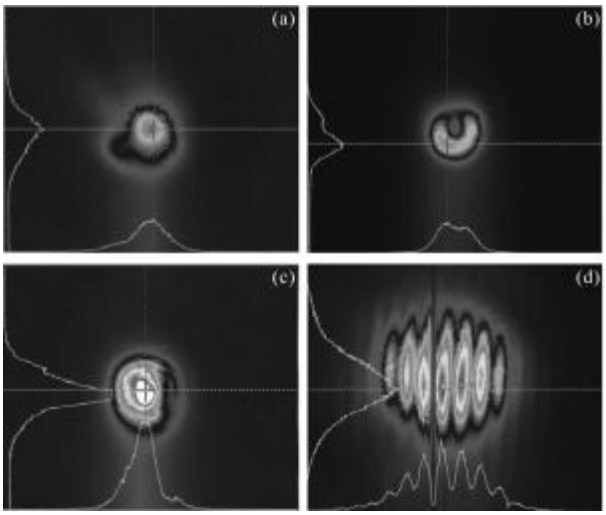


图 2 相干合成输出光斑图

Fig.2 Beam patterns of laser array

使用 Avantes 光谱仪(2 048)测量单路激光和合成激光光谱,如图 3 所示。从图中可以看出,两路激光重叠部分作为公共模起振，相干合成光束光谱位于两单元激光光谱之间。这从光谱的角度证明了两路光束实现了相位锁定以及相干合成。

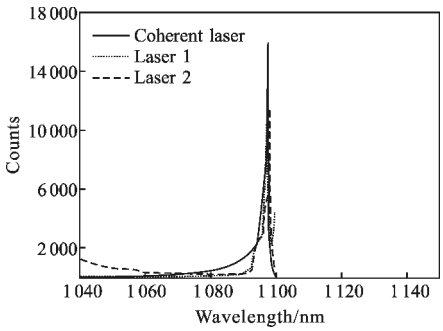


图 3 单元激光以及相干光束光谱图

Fig.3 Spectra of fiber lasers and coherent laser

另外,使用安捷仑频谱仪(N6141)测量相干激光输出频谱。由于两路光束已形成激光振荡,加之耦合输出镜 Mo 的影响，整个迈克尔逊相干合成系统形成复合腔,光谱成正弦包络状,如图 4 所示。这也从频谱的角度证明了相干合成的有效发生。

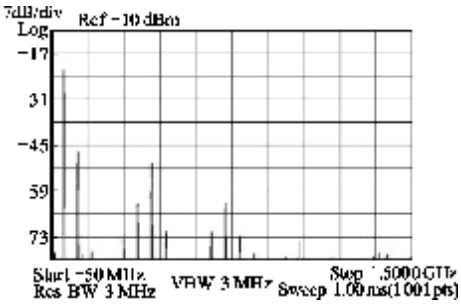


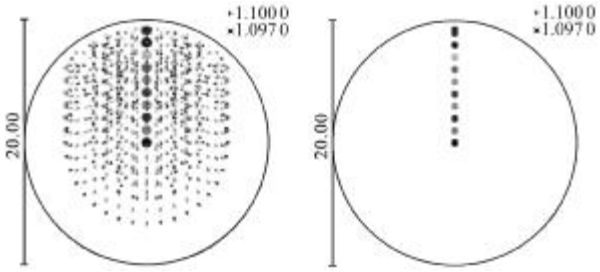
图 4 相干激光频谱图

Fig.4 Spectra of coherent beam

2.1　准直透镜设计对输出功率的影响

在基于迈克尔逊腔的相干合成系统中，准直透镜的作用是保持系统中光斑形状。光斑形状变化越小，经耦合输出镜反射后聚焦耦合再次进入光纤的能量越多。耦合效率越高,输出功率越高,因此,准直透镜的像差极大程度上影响着相干合成的输出功率。用 ZEMAX 对单透镜和双胶合透镜的像差进行分析,得到单透镜像差半径为 6.5 μm,双胶合透镜像差为 0.17 μm,整个视场的点列图如图 5 所示。图中+和×分别代表波长为 1 100 nm 和 1 097 nm 的光波,不

同颜色的点代表视场中不同位置的光斑情况。利用统计的方法计算得到单透镜的耦合效率为 60%,双胶合透镜耦合效率为 75%。理论上使用双胶合透镜的系统其输出功率应高于使用单透镜的系统。为了验证这一理论结果,分别实验测量使用单透镜和使用双胶合透镜时系统最终输出功率,结果如图 6 所示。实验中使用的透镜分别为大恒光电公司产品,型号为 GCL-010131(单透镜)、GCL-010661(双胶合消色差透镜)。从图中可以看出,使用双胶合透镜(Doublet)的迈克尔逊腔,输出功率和斜效率均略高于使用单透镜(Single Lens)的情况。因此认为,实验中输出光功率较低与准直透镜的像差较大,耦合效率较低有一定的关系,改善透镜设计可以使相干合成输出功率得到进一步的提高。



(a) 使用单透镜 (b) 使用双胶合透镜

(a) Single lens (b) Doublet

图 5 整个视场点列图

Fig.5 Spot diagram of the entire field of view

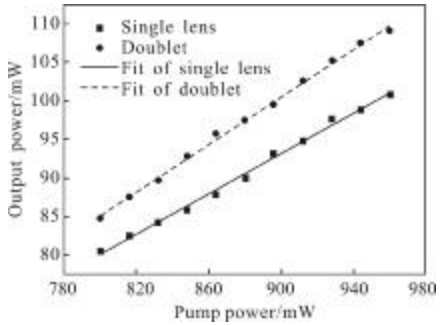


图 6 使用不同透镜时合成光束功率随泵浦光功率变化关系图

Fig.6 Power of combining beam vs pump power with single lens and doublet

从图 6 可以看出,系统的光-光转化效率较低,这主要是由于光纤长度较短,以及低功率下泵源波长漂移严重所致。文中使用的光纤增益系数标称为 1.0 dB/m,长度为 10 m,总增益为 10 dB,这远低于目前光纤激光器的典型增益 20 dB。另外,使用的泵源在低功率下波长为 964 nm (如图 7 所示),3 dB 带宽约为 2 nm,由于 Yb^{3+}的吸收峰很窄,因此很大一部分光能未能被吸收利用。综合考虑以上两点因素,整个系统的光-光转化效率较低是可以理解的。

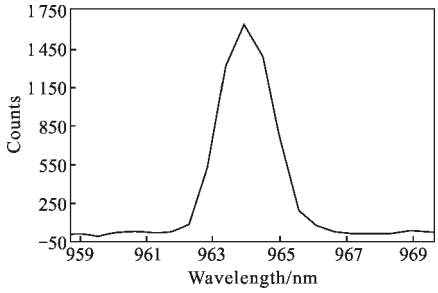


图 7 泵源在低功率 500 mW 下的光谱图

Fig.7 Spectra of pump laser at 500 mW

2.2 耦合输出镜反射率对输出功率的影响

在基于迈克尔逊腔的相干合成系统中,有两个功率输出端,即相干相长耦合输出端和相干相消端。虽然在理想的情况下,相干相消端功率为 0,但是由于两路激光功率并不完全对等,并且没有主动相位控制,所以相干相消端总存在一定的输出光功率。参考增益方程理论[13],耦合输出端和相干相消端的功率分别可以表达为:

$$I_{out}=(1-R^2)(t^2b_1^2+r^2b_2^2+2rtb_1b_2\cos 2\phi\delta l)$$

$$I_{BS}=r^2b_1^2+t^2b_2^2-2rtb_1b_2\cos 2\phi\delta l$$

式中:b_1、b_2 为两束光波振幅,$b_1=\frac{G+\lg\beta_1}{1-\beta_1^2}$,$\beta_1=\frac{Rt^2+\sin(2\phi\delta l)}{\sin(\phi(1+\delta l))}$,$b_2=\frac{G+\lg\beta_2}{1-\beta_2^2}$,$\beta_2=\frac{Rt^2+\sin(2\phi\delta l)}{\sin(\phi(1-\delta l))}$;$R$ 为耦合输出镜的振幅反射率;t、r 为分束镜的振幅透射率和反射率;G 为光纤增益。经化简后,光强与 $(1-R^2)\frac{D\lg(R)}{AR^4+BR^2+C}$ 成正比,A、B、C、D 为不同的常数。当增益、光纤长度等因素确定不变时,耦合输出镜反射率的变化将影响光功率在两个输出端的分布,理论计算和实验结果分别如图 8(a)和图 8(b)所示。图中实线代表相干相长耦合输出端的输出功率,虚线代表相干相消端的输出功率。在耦合输出镜的反射率选择合适的情况下,耦合输出端的功率高于相干相消端。但是随着耦合输出镜反射率的不断增加,相干相长耦合输出端功率 I_{out} 逐渐降低,相干相消端功率 I_{BS} 不断升高。耦合镜反射率的不断增大使得耦合输出端的损耗不断增大,当损耗超过相干相消端时,

光功率将转移到相干相消端输出。因此,可以选择合适的耦合输出镜反射率来优化两端的功率分布。

由于条件的限制, 实验中只使用了反射率分别为 20%、30%、40%、50%、60%的耦合输出镜,从耦合输出端功率曲线的趋势来看,反射率选择偏大,如有条件, 可以使用反射率小于 20%的耦合输出镜进一步增大耦合端的功率输出,抑制功率泄露。

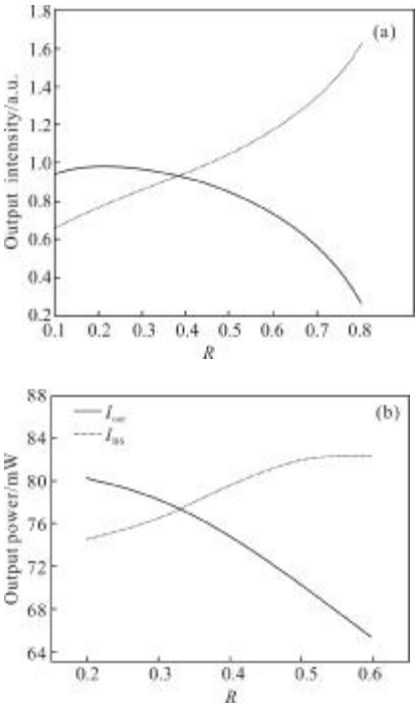


图 8 使用不同反射率的耦合输出镜时合成光束功率变化关系图

Fig.8 Power variation diagram of coherent beam when using different output couplers

2.3 两路泵浦功率的不平衡对输出功率的影响

参考增益方程理论, 可以得到耦合输出端和相干相消端输出功率的函数关系式。文献[13]指出,当两路增益情况完全相同时,泄露功率最小。文献中的增益综合了泵浦功率和光纤的长短的影响。在光纤长度难以改变的情况下, 可以调节两路泵浦功率来平衡两路增益。实验中,使用的两根光纤长度不完全相等,图 9(a)所示为当一路泵浦功率从 540 mW 变化到 950 mW,另一路泵浦功率维持在 650 mW 时的实验结果。可见, 相干相消端的泄漏功率经历了先减小、后增大的变化趋势。除此之外,两束光相位差改变时,两端输出功率的变化趋势也会有所改变,相位差是由于两路光程不等产生的。图 9(b)为当两路光束相位差分别为 0.01π,0.05π,0.1π,0.125π 时,两端输出功率随泵浦功率的变化曲线。事实上,很难保证两路光纤长度完全相等,在这种情况下,可以调节两路泵浦光功率、调节两路光程,以在一定程度上抑制相干相消端的功率输出。

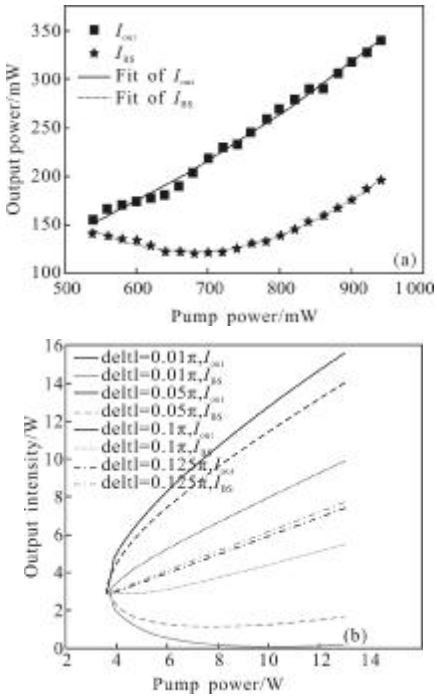


图 9 一路泵浦光保持不变时两端输出功率随另一路泵浦光功率变化关系图

Fig.9 power variation diagram of two channels when one pump power remains unchanged

3 结　论

文中利用迈克尔逊耦合腔进行了 D 型双包层光纤激光器相干合成的实验研究, 实现了两路光纤激光的相干合成,得到了单一光斑输出。根据理论分析,在其他参数不变的情况下,可以通过设计准直透镜以减小象差、选取反射率合适的输出耦合镜、调节两路泵浦光功率等措施, 来进一步提高相干合成效率,获得良好的相干合成输出效果。此外,参考文献[12]中的实验装置,将研究结果推广到多路,实现多台光纤激光器迈克尔逊腔的相干合成, 这将是下一步工作的重点, 笔者会在后续的工作中对多路迈克耳逊腔光纤激光的相干合成做详细的分析。

该实验定位于对物理现象的解释和探索, 但由于诸多条件限制, 整体实验系统没能进行完整的优化,因此最终输出功率较低。在实验装置中,原理上

没有损伤阈值受到严格限制的光学元件,因此,在对实验系统总体优化以后,功率将有大幅度的提升。

参考文献:

[1] Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 163-166. (in Chinese)
程勇, 刘洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 163-166.

[2] Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Coherent combining of fiber lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 29(5): 516-518. (in Chinese)
肖瑞, 侯静, 姜宗福. 光纤激光器的相干合成技术[J]. 红外与激光工程, 2005, 29(5): 516-518.

[3] Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and it's coherent beam combination [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 155-159. (in Chinese)
楼祺洪, 何兵, 周军. 光纤激光器及其相干组束[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 155-159.

[4] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, et al. Coherently coupled high power fiber arrays[C]//SPIE, 2006, 6102: 61020U-1-5.

[5] Wrage M, Glas P, Leitner M. Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structured mirrors [J]. Opt Lett, 2001, 26: 980-982.

[6] Zhou Yi, Liu Liping, Yonatan Abranyos, et al. Phase locking of a two-dimensional laser array by controlling the far-field pattern[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(16): 3025-3027.

[7] Jacques Morel, Alain Woodtli, Rene Dandliker. Coherent coupling of an array of Nd^{3+}_doped single-mode fiber lasers by use of an intracavity phase grating [J]. Opt Lett, 1993, 18: 1520-1522.

[8] Sabourdy D, Agnès Desfarges-Berthelemot VK, Alain Barthélémy. 975 -nm single-mode laser source: external coherent combining of two pigtailed laser diodes[J]. IEEE J Quant Electron, 2004, 10(5): 1033-1038.

[9] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges -berthelemot A, et al. Coherent combining of two Nd:YAG lasers in a Vernier-Michelson-type cavity[J]. Appl Phys B, 2002, 75: 503-507.

[10] Moti Fridman, N D Vardit Eckhouse, Asher A Friesem. Efficient coherent addition of fiber lasers in free space [J]. Opt Lett, 2007, 32(7): 790-792.

[11] Kozlov V A, Hemandez-Cordero J, Morse T F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers [J]. Opt Lett, 1999, 24: 1814-1816.

[12] Peng Qinjun, Sun Zhipei, Chen Yahui, et al. Efficient improvement of laser beam quality by coherent combining in an improved Michelson cavity [J]. Opt Lett, 2005, 30(12): 1485-1487.

[13] Simpson T B, Gavrielides A, Peterson P. Extraction characteristics of a dual fiber compound cavity [J]. Opt Exp, 2002, 10(20): 1060-1073.