

文章编号: 0253-2239(2010)11-3209-06

环形腔被动锁相一维三路光纤激光相干组束研究

李震^{1,2,3} 周军^{1,2} 何兵^{1,2} 薛宇豪^{1,2,3} 漆云凤^{1,2} 刘驰^{1,2,3} 楼祺洪^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对基于环形腔光反馈的光纤激光被动锁相技术进行了理论和实验研究。建立了一维三路光纤激光阵列的相干组束实验装置, 实现了三束光纤激光的相位锁定, 观测到稳定的干涉图样。研究了光束占空比对远场光斑的影响, 分析了影响腔内损耗的主要因素。观测到相干耦合输出光谱中所存在的多波长峰值随机出现的现象, 通过采用窄带宽滤光片, 可以限制相干耦合输出的光谱范围, 但上述现象仍然存在。从理论上对被动锁相技术中所存在的这种波长随机现象进行了分析和解释。

关键词 激光器; 光纤激光; 相干组束; 被动锁相

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3209

Coherent Beam Combination of Passive Phase Locking of an Array of Three Fiber Lasers in One Dimension by a Ring Cavity

Li Zhen^{1,2,3} Zhou Jun^{1,2} He Bing^{1,2} Xue Yuhao^{1,2,3} Qi Yunfeng^{1,2}
Liu Chi^{1,2,3} Lou Qihong^{1,2}

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai 201800, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Technique for passive phase locking of fiber lasers by an all-optical feedback loop is studied theoretically and experimentally. The experimental setup of coherent beam combination of three fiber lasers in one dimension is built, and phase-locking of three fiber lasers is achieved and stable interference patterns are observed. The influence of duty ratios on the interference patterns in the far field is studied. Main factors that affect the cavity loss are analyzed. Random peaks corresponding to different wavelengths are found in the spectrum of coherent output laser. By using a narrow bandwidth filter, the spectral range of coherent output laser can be restricted. However, the phenomenon mentioned above still exists. And theoretical analysis is given to explain these random wavelengths existing in this kind of technique for passive phase-locking.

Key words lasers; fiber laser; coherent beam combination; passive phase locking

1 引言

近年来, 基于包层抽运技术的光纤激光器以其光束质量好、转换效率高以及结构紧凑等特点吸引了人们的广泛关注。目前, 大功率的光纤激光器被广泛应用于精密焊接和切割等工业领域中, 并在军

事领域呈现出广阔的应用前景。近年来, 光纤激光器的输出功率快速提升, 2004年光纤激光器的单纤输出功率达到千瓦量级^[1], 2009年IPG公司^[2]报道已实现了单纤万瓦的单模激光输出。但由于光纤中存在的非线性效应以及热损伤等问题, 单根光纤所

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-03-03

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)、国家自然科学基金(60907045, 60908011)和上海市科技启明星计划(09QB1401700)资助课题。

作者简介: 李震(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器及相干组束等方面的研究。E-mail: lznkgx@163.com

导师简介: 周军(1972—), 男, 研究员, 主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

能承受的激光功率不可能无限制地提高。理论研究表明,对于目前的材料和条件,综合考虑各种物理因素,对于宽带光纤激光器,输出衍射极限激光的功率上限为 36.6 kW,对于窄带光纤激光器,功率上限为 1.86 kW^[3]。基于相干组束技术的光纤激光阵列可在提高输出功率的同时,保证其良好的光束质量,是实现高功率、高亮度激光输出的有效途径,得到了国内外研究者的重视。

光纤激光阵列的相干组束可以分为主动锁相和被动锁相两种方式。主动锁相方式需要实时地对相位进行探测和反馈控制^[4],导致整个系统较为复杂。国内也有很多相关研究报道^[5~7]。相比于主动锁相技术,光纤激光阵列的被动锁相无需复杂的电控反馈,直接通过光学的方法就可实现各子光束的相位锁定,结构相对简单。常见的被动锁相的方案有自傅里叶腔^[8]、自成像腔空间滤波^[9~11]、Talbot腔^[12,13]和多芯光纤自组织^[14]等。2007年 Jérôme Lhermite 等^[15]对基于环形腔光反馈的被动锁相技术进行了报道,实现了对四路掺铒光纤激光的相干组束,但由于所用掺铒光纤为常规单模光纤,功率难以提升。最近,Joshua E. Rothenberg 以及 Erik J. Bochove 等^[16,17]也对环形腔光反馈被动锁相的机理进行了研究,为实验提供了较好的指导。

采取环形腔光反馈被动锁相的技术方案,以双包层掺镱光纤为放大器,建立了一维三路光纤激光相干组束的实验装置,实现了三束光纤激光的相位锁定,获得了 1.1 W 的相干耦合输出功率。研究了不同光束占空比对相干耦合远场光斑的影响,并进行了理论分析。观测到相干耦合输出光谱中的多波长随机出现现象,并进行了理论解释和分析。

2 实验原理与装置

对于采用环形腔光反馈被动锁相的 N 路光纤激光相干组束,在整个环形腔中对应有 N 路光纤放大器,每一路放大器的输出光经过准直后通过同一个分束片。在分束片的作用下,一部分激光作为整个组束系统的输出,另一部分激光则经过傅里叶透镜聚焦耦合到一根单模光纤中,单模光纤的纤芯大小应与 N 路激光组束后所形成的干涉光场的中心光斑大小相匹配。单模光纤在整个组束激光器中起到反馈作用,在其中所传输的光在经历 $1:N$ 分束器的分束后,分别注入到每一路光纤放大器。可以将单模光纤所提供的反馈信号光看作每一路光纤放大器的种子光,由于光纤放大器的输出特性与种子光

有关,而每路光纤放大器的种子光都是由整个组束系统的一部分输出光作为反馈所充当的,所以每路光纤放大器的输出特性都与其他两路有关。以上就是环形腔光反馈被动锁相 N 路光纤激光相干组束的实验方案。

在这种实验方案中, N 路光纤放大器在理想情况下每路中增益光纤的长度是相同的。光纤放大器阵列的输出光束经分束后的一小部分由一根单模光纤所收集。单模光纤提供了反馈,同时也起到空间滤波的作用。通过实时观察 CCD 所显示的光斑图样,仔细调节单模光纤的位置,当中心亮条纹强度最大时,干涉光场中的同相模成分恰好耦合到纤芯中从而反馈注入回每一路光纤放大器中,而异相模因不能耦合入纤芯而产生较大的损耗^[18]。这样,在整个激光器中由于同相模成分获得了较高的增益而形成振荡,实现了相位锁定。由于在实际情况下,不可能保证每路光纤放大器的光纤长度相同,即在各路之间存在光程差。而在实验中仍然可以观察到稳定的干涉条纹^[15]。激光器会自适应选取合适的工作波长以获得最佳的相位锁定效果。

实验装置如图 1 所示。三路光纤放大器为自制的单频保偏光纤放大器,所用增益光纤为保偏双包层掺镱光纤(YDF),纤芯与内包层的直径分别为 $5\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$,光纤长度均为 5 m。每路放大器中均连接有光隔离器,以避免后向散射激光的影响。抽运源采用 975 nm 的半导体激光器。抽运光通过一个 $(2+1)\times 1$ 的耦合器的其中一个输入端耦合到双包层光纤,耦合器的另一个输入端闲置不用。每路光纤放大器的输出光束经焦距为 f_m 的准直透镜(口径 5.5 mm)准直后输出。经过分光比为 1:99 的分束片之后,能量较小的那一部分通过焦距为 f 的傅里叶透镜,耦合入单模保偏光纤作为反馈信号光,另一部分即为该系统的相干耦合激光输出。单模光纤的反馈光信号通过一保偏光纤放大器后,再分成 4 路,其中的三路反馈信号光分别进入 3 个主放大器。实验中采用了 3 个 3 dB 保偏分束器,其中一个输出端口处放置功率计来监测反馈信号光,若反馈信号光功率过低,即注入到每路光纤放大器中的种子光功率过小时,可通过增大反馈链路中的抽运功率来调节。实验中的光纤器件均使用保偏熔接机进行对接,其他分立光学元件均为偏振无关器件,保证了相干组束对偏振态的要求。实验中采用 CCD(Spiricon SP620U)来观测记录远场光斑图样,采用光谱仪(Yokogawa AQ6370)测相干耦合输出光谱。

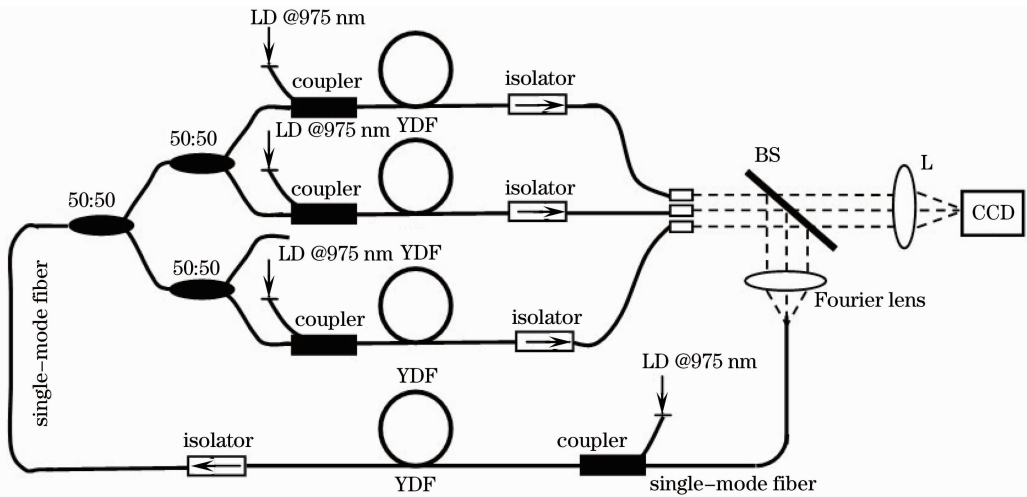


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

3 实验结果与分析讨论

采用图 1 的实验装置,将 3 个光纤放大器输出激光的光束直径、发散角、方向性均调节一致,并将输出准直器在水平方向上一维均匀排布,通过精确调节反馈信号光纤的耦合,实现了三路光纤激光的相位锁定,观测到稳定的远场干涉图样。图 2(a)为在三路激光光束的相邻中心间距为 6 mm 时,获得的稳定干涉图样,存在一个明显的中央主瓣,在中央主瓣两侧,各有一个能量很弱的旁瓣。

3.1 光束占空比对远场光斑的影响

子光束占空比是影响激光阵列远场相干的重要因素之一,对此进行了实验研究。在相邻光束中心间距为 6 mm,即对应占空比为 0.92 时的相干实验基础上,逐渐增大相邻光束的间距(对应占空比减小),发现随着光束间距的加大,远场干涉图样中干

涉条纹的数目增多,且中央主瓣的宽度缩小,其所占的能量也逐渐下降。图 2(b)给出了相邻激光束的中心间距为 12 mm 时,相对应占空比为 0.46,在 CCD 上观察到稳定的远场干涉条纹,可看到在中央主瓣两侧,各有两个旁瓣,共 5 个光瓣。此外,当占空比较大时,由图 2(a)可得中心亮条纹的对比度为 0.81。而当占空比较小时,由图 2(b)可得中心亮条纹的对比度下降为 0.66。实验中,通过调节反馈光纤放大链路中的抽运源可以改变反馈信号光的强度。实验发现,当反馈链路中的抽运功率小于 0.3 W 时,反馈信号光过弱,会导致干涉条纹消失;而当反馈链路中的抽运功率大于 0.6 W 时,反馈信号光过强,会导致干涉条纹不稳定。这表明反馈信号光强度应在一定范围内优化选取。实验中可以根据需要,调节反馈信号光到合适的强度。

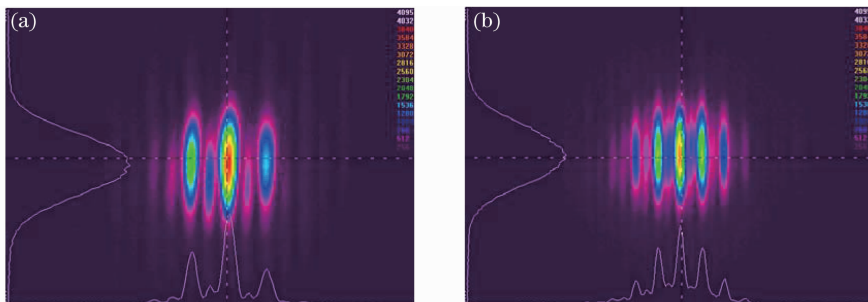


图 2 不同占空比情况下远场干涉图样。每路激光束中心间距(a)6 mm;(b)12 mm

Fig. 2 Interference patterns in far field for different duty ratios. The distance is (a) 6 mm and (b) 12 mm for two adjacent beam centers

对上述的实验结果,进行了相应的理论分析。对于均匀分布的一维三路光纤激光,由于实验中所

采用的增益光纤所传输的模式为单模,激光光场均为高斯分布,根据参考文献[19]可以计算出三路光

纤激光相干组束后的远场光强分布。图 3 为理论计算的三路一维相干光束的远场干涉图样,其中图 3(b)所对应的光束中心间距为图 3(a)中的 2 倍。可见当光束占空比减小(即相邻光束中心间距增大)

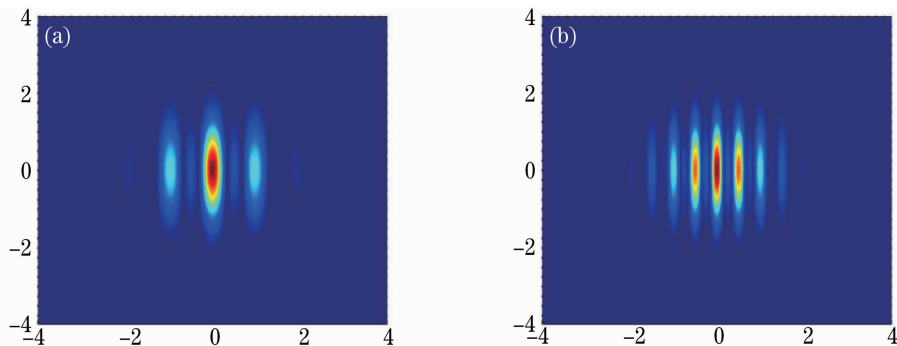


图 3 不同占空比情况下远场理论干涉图样。每路激光束中心间距为(a) d_x ; (b) $2d_x$

Fig. 3 Theoretical interference patterns in far-field for different duty ratios. The distance is (a) d_x and (b) $2d_x$ for two adjacent beam centers

腔内损耗是影响激光器输出特性的一个重要因素,对于所研究的环形腔结构的光纤激光被动锁相系统来讲,可以看作是一环形腔结构的激光器,其输出特性与腔内损耗密切相关。在这种系统中,可控腔内损耗的一个主要来源就是反馈信号光到单模反馈光纤的耦合。根据文献[17],该耦合效率可以表示为

$$U_j = 2 \left(\frac{\omega}{\omega_2} + \frac{\omega_2}{\omega} \right)^{-1} \exp(-\gamma^2 R_j^2), \quad (1)$$

其中 $\omega_2 = \omega_0 f / f_m$ 为傅里叶透镜焦点处的光斑半径, ω_0 为双包层增益光纤中的模场半径; ω 为单模光纤中的模场半径; 离轴耦合系数 $\gamma = \frac{\pi \omega \omega_2}{\lambda f (\omega^2 + \omega_2^2)^{1/2}}$;

R_j 是第 j 路光束的中心到傅里叶透镜中心的距离,对于三路光纤激光的相干组束, $R_j = \begin{cases} 0, & j = 0 \\ d_x, & j = \pm 1 \end{cases}$ 。从这个耦合效率的表达式可以得出,只有在 $\omega_2 \gg \omega$ 时,耦合效率 $U_j \approx \frac{2\omega}{\omega_2} \exp[-(\omega/\omega_2)^2 (\pi\omega_0/\lambda f_m)^2 R_j^2]$,

这时耦合效率才能够不会随着 R_j 的增大而迅速下降。如果要组束的光束比较多,且离轴最远的光束所对应的 R_j 较大,这时就可以通过减小耦合效率来实现其有效耦合。实验中仅有三路光纤激光的相干组束,实验中 $f = 12 \text{ cm}$, $f_m = 2 \text{ cm}$,由此可得 $\omega_2 \approx 6\omega$ 。这就表明傅里叶透镜焦点处的聚焦光斑半径要大于反馈光纤中的模场半径。另外,由于光纤激光一维阵列的相干组束所对应远场光斑的中央主瓣并不是一个圆形光斑,而是一长椭圆形光斑,这就导致

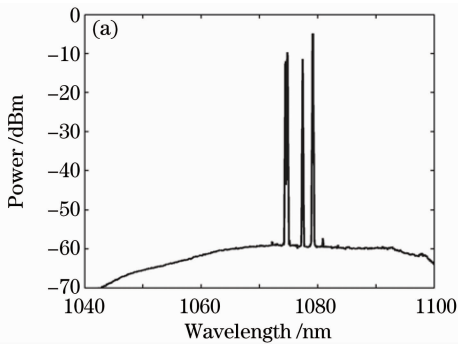
时,干涉条纹的数目增加,同时中央主瓣的宽度变窄,其所占总能量的百分比大幅下降。理论分析和实验结果一致。

了光斑的大部分能量并不能有效耦合到单模光纤。以上这些因素都使得整个环形腔被动锁相系统的腔内损耗增加。前面也提到,当反馈信号光强度过小时,会导致干涉条纹消失。在实验中,当所用分束片的光分比一定时,可以通过加大反馈链路中的抽运功率以使反馈信号光强度增大,保证有效锁相的实现。在实验中,每路光纤放大器的抽运光功率均为 2.5 W 左右,在 CCD 所在的位置处放置光功率计,获得 1.1 W 的相干耦合输出功率,光束占空比的改变对总输出功率基本没有影响。对于一维阵列的相干组束,若在傅里叶透镜之前插入一合适的柱透镜,将椭圆形主瓣再进行压缩,提高其到单模反馈光纤的耦合效率,可以减小反馈信号耦合时的能量损失,降低腔内损耗,提高整个系统的效率。

3.2 组束后的光谱特性分析

在实验中将光谱仪放置在 CCD 所处的位置,观测到组束后的输出光谱如图 4(a)所示。实验发现,输出光谱并不稳定,而是表现为在一定的带宽内,多个峰值随机出现的一种动态光谱特性,并且这些峰值并不对应固定的波长。同时,发现在输出光谱特性变化时,对应的相干耦合输出功率以及远场相干图样均保持稳定,并不发生任何变化。为了从实验上检验这种现象是否由于增益带宽过宽而引起,在傅里叶透镜与单模反馈光纤之间插入一个透射带宽约为 2 nm,中心波长为 1064 nm 的滤光片。在相同抽运电流的情况下,观测到的输出光谱如图 4(b)所示,可见加入滤光片,的确可以使得输出激光波长控

制在 2 nm 的带宽范围内,但光谱存在的多个峰值波长随机出现的现象并未发生改变。另外,测量发现两



种情况下的相干耦合输出功率基本相同,可见滤光片的加入并未对激光器的输出功率造成显著影响。

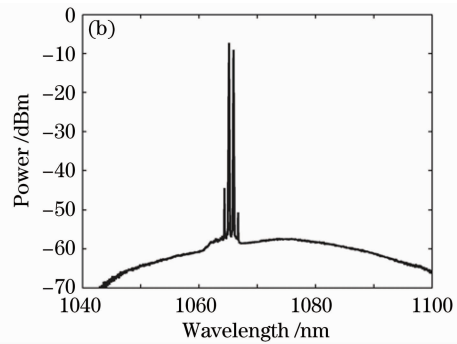


图 4 输出激光的光谱曲线。(a)未插入滤光片;(b)插入滤光片之后

Fig. 4 Spectrum of output laser. (a) Without filter; (b) with a filter

对于实验三路光纤激光的相干组束,输出激光的斯特雷尔比与波长的对应关系为^[16]

$$S(\omega) = \frac{1}{9} \left| \sum_j^3 \exp(i\omega\tau_j) \right|^2, \quad (2)$$

其中 $\tau_j = [(nL)_j - (nL)_{\text{avg}}]/c$, $\omega = 2\pi c/\lambda$ 。这里的 $(nL)_j$ 为每路放大链路中的光程, $(nL)_{\text{avg}}$ 为三路放大链路的平均光程。实际上,每路光纤放大器中的光纤长度不可能完全相同,并且激光器工作时的热效应等也会引起光程的改变。在理论分析中假设三路光纤的长度成一个以平均值为 5 m 均方根差为 10 cm 的正态分布。当激光器在未插入滤光片时,如图 4(a)所示实验测得光谱范围大约为 10nm。相应的理论计算结果见图 5(a)。图 5(a)给出了在

10 nm 带宽范围内斯特雷尔比随波长的变化关系。分析表明在 10 nm 的带宽范围内,在很多个波长处都能获得较大的斯特雷尔比。而对应斯特雷尔比越大的纵模由于所获得的腔内增益也越大^[17],更容易形成振荡。对于在光路中插入滤光片的情况,相应的理论分析结果如图 5(b)所示。即使在 2 nm 的带宽之内,仍有着大量斯特雷尔比足够大的的对应于不同波长的峰值,这些波长所对应的纵模都有可能在腔内形成振荡,也就导致了实验光谱中所出现的多个随机峰值。滤光片的作用仅仅使得激光器腔内 1064 nm 附近 2 nm 的带宽中的纵模才有可能形成振荡。

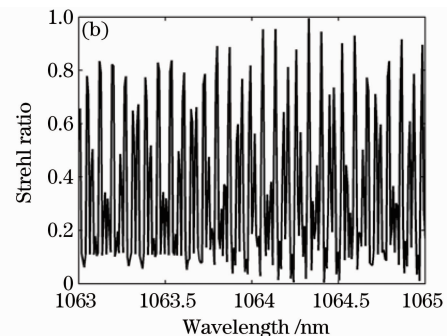
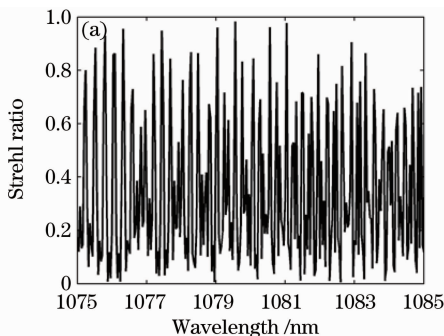


图 5 斯特雷尔比关于波长的关系曲线。(a)未插入滤光片;(b)插入滤光片之后

Fig. 5 Strehl ratio versus wavelength. (a) Without a filter; (b) with a filter

4 结 论

采用环形腔光反馈被动锁相实验方案,对三路光纤激光的相干组束进行了理论和实验研究。建立了一维三路光纤激光的相干组束实验装置,实现了三束光纤激光的相位锁定。实验观测了在不同占空比情况下的远场光斑,并且计算了远场光斑的理论图样,实验结果与理论结果相吻合。对反馈信号光

注入到单模光纤时的耦合效率进行了分析。通过观测组束后的输出光谱,发现光谱中存在多波长峰值随机出现的现象,整个激光器的工作波长不能锁定不变,但此时的远场光斑和输出功率是稳定的。采用窄带滤光片可以起到限制输出激光光谱范围的作用。但多波长峰值随机出现的现象仍然存在。最后从理论上对上述现象做了简单的分析。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 2 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Opt. & Photon. News*, 2008, **19**(5): 46~51
- 3 J. W. Dawson, M. J. 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
- 4 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12015~12021
- 5 Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing *et al.*. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 518~524
刘泽金,周 朴,侯 静等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 518~524
- 6 Pu Zhou, Zilun Chen, Xiaolin Wang *et al.*. Synchronization and coherent combining of two pulsed fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 523~525
- 7 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination based on active phase controlling at the high-power output port[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2503~2505
周 朴,马阎星,王小林等. 基于高功率激光输出端相位控制的光纤激光相干合成[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2503~2505
- 8 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): 20118~20121
- 9 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. 两根大芯径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
- 10 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113 W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 412~414
- 11 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chinese 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
- 12 A. P. Napartovich, D. V. Vysotsky. Phase-locking of multicore fibre laser due to Talbot self-reproduction[J]. *J. Mod. Opt.*, 2003, **50**(18): 2715~2725
- 13 L. Li, A. Schulzgen, S. Chen *et al.*. Phase locking and in-phase supermode selection in monolithic multicore fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2577~2579
- 14 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
- 15 J. Lhermite, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermene *et al.*. Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1842~1844
- 16 J. E. Rothenberg. Passive coherent phasing of fiber laser arrays [C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 687315
- 17 E. J. Bochove, S. A. Shakir. Analysis of a spatial-filtering passive fiber laser beam combining system[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 320~327
- 18 Bing He, Qihong Lou, Wei Wang *et al.*. Experimental demonstration of phase locking of a two-dimensional fiber laser array using a self-imaging resonator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(25): 251115
- 19 C. D. Nabors. Effects of phase errors on coherent emitter arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(12): 2284~2489