

文章编号: 0258-7025(2010)12-2964-05

双端输出光纤激光器互注入锁相研究

朱孟真¹ 黄长春² 程勇¹ 刘洋¹ 米朝伟¹ 王会升¹ 万强¹

(¹ 武汉军械士官学校光电研究所, 湖北 武汉 430075; ² 河南工业职业技术学院机械工程系, 河南 南阳 473009)

摘要 为了获得高功率、高光束质量相干光纤激光输出,设计了一种双端输出的光纤激光器。两路光纤激光器尾端通过反射率为 85% 的光纤布拉格光栅连接,有一定的相互关联,利用角锥反射器使其能量相互注入,实现锁相,并利用偏振片分光,实现相干合成输出。实验上,在远场得到了清晰稳定的干涉条纹(可见度约为 0.92),获得了 8.6 W 的相干合成激光输出,对应的功率合成效率约为 90%。实验结果表明,该方案结构简单,稳定性好,相干度高,并可用于多路激光相干合成,为实现高功率光纤激光相干合成输出提供了一种新的思路。

关键词 激光技术;相干合成;关联光纤激光器;角锥;偏振片

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.2964

Mutual Injection Phase-Locked Study of Fiber Laser with Two Output Ports

Zhu Mengzhen¹ Huang Changchun² Cheng Yong¹ Liu Yang¹
Mi Chaowei¹ Wang Huisheng¹ Wan Qiang¹

(¹ Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officer Academy, Wuhan, Hubei 430075, China)
² Mechanic Department, Henan Polytechnic Institute, Nanyang, Henan 473009, China)

Abstract A novel fiber laser with two output ports is designed to realize high power and high quality fiber laser coherent beam combining output. The two fiber lasers associated with each other are connected by a fiber bragg grating (FBG) ($R=0.85$ at 1085 nm). Based on a corner-cube, the energy is mutual injected with each other. And by a polarizer, coherent beam combining output is realized. Through experiments, steady interference stripes with high contrast ratio (about 0.92) are observed and 8.6 W output power is achieved which indicate that the power combining efficiency is approximately 90%. This combining method can be scaled to a large number of lasers. Successful attempts of phase-locked show that this method may provide a promising way in the field of fiber laser coherent combining.

Key words laser technique; coherent beam combining; relating fiber laser; corner-cube; polarizer

1 引言

光纤激光器(FL)由于具有结构简单、散热效果好、转换效率高、输出光束质量好和运行成本低等优点,在激光切割、激光焊接和激光武器等领域有广泛的应用前景^[1~3]。随着大模场双包层光纤技术的发展,单根光纤激光器的输出功率已经达到数千瓦量级。但是,由于介质的非线性效应、光学损伤和热损伤等物理机制的限制,单台光纤激光器的平均亮度不能无限提高并且已经接近极限^[4]。为实现更高的亮度输出,必须在提高激光输出功率的同时保持良

好的光束质量。一种重要的技术途径是激光相干合成^[5~7]。

目前,国内外已经提出了自傅里叶变换腔、自成像腔、单模光纤滤波环形腔、多芯光纤、全光纤自组织、相位共轭法和主振荡功率放大(MOPA)主动锁相结构等多种实现相干光束合成的方法。自傅里叶变换腔进行激光器阵列相干合成要求激光器排列满足自在现函数的要求,对光纤激光器阵列输出端的排布定位和输出功率分布提出了很高的要求,且反馈能量损失很大,合成效率普遍较低^[8]。利用自成

收稿日期: 2010-06-25; 收到修改稿日期: 2010-07-29

基金项目: 国防预研项目(51302010206)资助课题。

作者简介: 朱孟真(1982—),男,硕士,讲师,主要从事固体激光器及相干合成等方面的研究。E-mail: mzhzhu@163.com

像腔^[9,10]实现相干合成由于空间滤波引入能量损耗,腔中单元光束的效率会随着激光器数目的增多而降低。滤波环形腔^[11]是近几年才提出的一种新型外腔合成方案。理论和实验表明^[12],滤波环形腔的相位控制效率将随着激光功率的增大和数目的增多而下降。多芯光纤输出端直接耦合法制作的光纤激光器阵列能够实现的光纤激光器数目有限,输出端热效应突出,难以获得大功率激光输出^[13,14]。全光纤合成采用光纤耦合器将多根光纤的输出激光组合到一根光纤,最终还是受限于单根光纤的功率承受能力^[14]。2009年,美国 Northrop Grumman 采用“MOPA 主动锁相结构”实现了 7 路万瓦级激光合成获得了 105.5 kW 的激光输出,然而 MOPA 主动锁相方案需要对每个子激光器进行相位探测和补偿,其结构过于精密和复杂,系统特别庞大,实现起来相当困难^[15],并且光束质量也不理想。

文献[16]基于角锥的后向反射特性和 45°半透半反分束镜实现了两路光纤激光器的能量互注入,但是合成效率和条纹对比度都较低,且可扩展性有

限。基于角锥的对称反射和退偏特性以及偏振片的偏振分束效应,本文设计了一种基于角锥互注入实现两路尾端相互关联光纤激光器锁相合成方案,实验上观察到了清晰稳定的干涉条纹,条纹对比度高达 0.92,功率合成效率约 90%。

2 互注入相干合成原理和实验方案

基于角锥互注入锁相的双端输出光纤激光器相干合成实验结构和光路如图 1 所示。激光器采用的是自主研发的掺 Yb³⁺ 双包层双端输出光纤激光器。激光器的输出两端结构完全相同,两台带尾纤输出的半导体激光器(LD)(发射波长为 975 nm)为抽运源。两路光纤尾端由两边对称的光纤布拉格光栅(FBG)(波长为 1085 nm 时反射率 $R=0.85$)相互连接作为后反射镜,当两路光纤激光器工作时,分别有 15% 的能量通过光栅注入到另一路中,使其有一定的相互关联。增益光纤为 3 m 长的 Yb³⁺ 掺杂双包层光纤,尾端连接组合透镜式准直器(FC)输出,准直器对信号光增透,因此不能与 FBG 形成谐振。

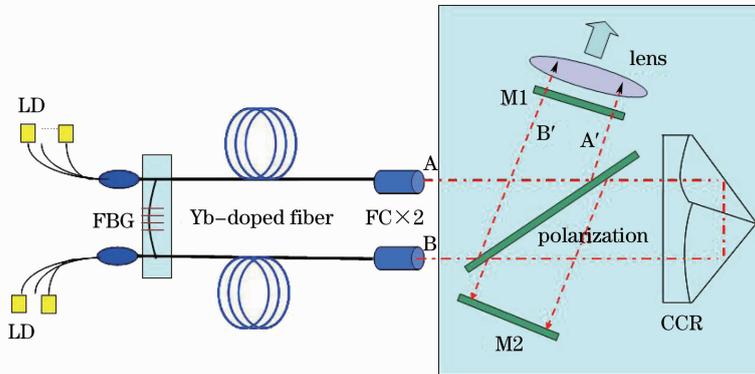


图 1 系统结构图

Fig. 1 Schematic of system setup

锁相系统(图 1 阴影部分所示)由偏振片、角锥反射器(CCR)和反射镜 M1, M2 组成。两路光纤激光器的输出光束平行且与角锥底面垂直,对称分布在角锥顶点两侧,偏振片位于角锥与准直器之间,且以布儒斯特角放置。两路光纤激光器输出的激光都是随机偏振光。

A 路光纤激光的输出光与偏振片相遇, p 光全部透射, s 光被全部反射, 由于激光器发出的是随机偏振光, 故透射光和反射光各占能量的 50%。A 路透射的 p 光经角锥对称反射后退偏为椭圆偏振光, 经过偏振片后, 其中的 p 光部分对称的注入到 B 路光纤激光中。同理, B 路光纤激光发出的光经偏振片分光和角锥的退偏对称反射后也有一部分能量注入到 A 路光

纤激光中使两路激光能量通过角锥实现外部互相注入, 从而达到相位锁定, 文献[9, 17~19]对光纤激光的互注入锁定原理进行了详细的分析。

在相互注入锁定的过程中被偏振片反射的 s 光作为输出(A' 和 B')形成偏振耦合输出, 用一块对信号光反射率为 20% 的平面镜 M1 作为 s 光的输出镜, 使一部分 s 光被反射回腔内, 形成谐振, 使激光器能够稳定输出。同时, 用全反镜 M2 将损失的 s 光全部反射回腔内, 减小损耗, 将输出功率提高到最大。

3 实验结果及讨论

对于光纤激光器相干合成方案来说, 主要从光

束质量、合成效率和可扩展性等方面考察其向大功率、多数目激光合成拓展的可行性与实用性。故基于实验条件分别从以下三方面进行了研究:1)相干合成光束的远场光强分布,体现出激光阵列的相干性;2)激光阵列的功率合成效率^[15];3)对于 MOPA 主动锁相,要求光纤激光单频、偏振输出,为了研究双端输出光纤激光通过角锥注入锁定之后波长和相位锁定的情况,本文采用了光纤光谱仪观察相干合成前后波长的精细结构。

3.1 合成前后远场光强分布的变化

实验中用一个 1 m 正透镜将两路激光进行聚焦,根据傅里叶光学知其焦平面处光强分布等效为两路光纤激光相干合成输出的远场分布。采用 Spiricon 公司生产的 LBA-FW-SCOR 型激光光斑

分析仪(CCD,软件版本 4.83)测量两路光纤激光通过角锥互注入前后远场光强分布。

由于两路光纤激光都是单模随机偏振输出,分别独立振荡输出时的光强分布均为高斯分布,如图 2(a)和(b)所示。实验时,首先用一块金属挡片置于偏振片与角锥之间,使角锥互注入锁相系统处于开环状态。此时测得 1 m 正透镜焦面处的光强分布为未通过角锥实现互注入时的两路光纤激光合成的远场光强分布,即两路激光器只通过尾端反射率为 85% 的 FBG 相互关联时的远场光强分布,如图 3(a)所示。合成光强除了在强度上有所增加外,还有微弱的干涉现象,但很不明显,说明此时两路激光有一定关联,但相干性很差。

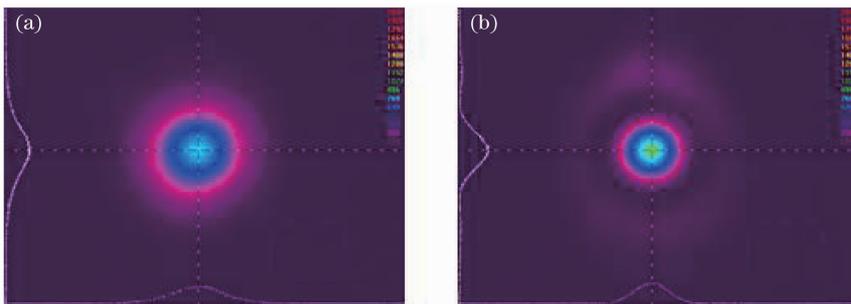


图 2 两路光纤激光独立输出时的光强分布。(a) A 路光纤激光,(b) B 路光纤激光

Fig. 2 Beam spatial profile of fiber laser A and B at free running state. (a) fiber laser A, (b) fiber laser B

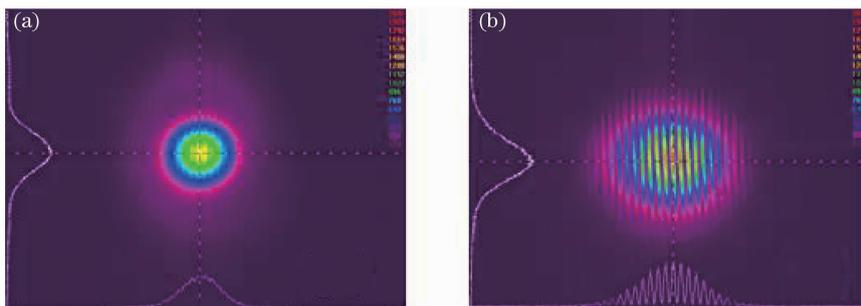


图 3 两路光纤激光合成远场分布。(a)直接合成,(b)互注入锁定

Fig. 3 Far field pattern of the two fiber lasers under different conditions. (a) free running, (b) mutual injection-locking

撤走挡片,使两路光纤激光的能量通过角锥和偏振片实现互注入,精密调节光路,转动角锥,使两路激光通过角锥的互注入效率达到最高,并且使 M1 和 M2 与两路光纤激光器达到同步谐振。此时测量的光强分布即为两路光纤激光器实现互注入锁定后的合成光强分布。图 3(b)为电流 2.0 A 时的实验结果,其远场光强分布是明显的两路激光相干合成的振幅叠加模式,远场的干涉条纹非常清晰,具有很高的相干度。说明两路原本相干度很低的光纤激光通过角锥使能量相互注入,使得它们之间的关

联程度进一步提高,振荡模式之间相互影响,从而达到共同的振荡状态,实现了锁相输出。

在长时间曝光下,干涉图样稳定性非常好,几乎无抖动,说明两台激光器实现了稳定的相位锁定。利用公式

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

计算可得条纹可见度约为 0.92。实验中,两路光纤激光准直器准直光束直径约 0.5 mm,它们之间的中心间距约 5 mm,占空比约为 0.1,故条纹间距较密。需要说明的是光纤激光的合成效果还跟光纤激

光强度、平行度等有关,实验中无法使其严格相等和平行,因此方案可能的相干效果还可以提高。

3.2 功率合成效率

功率合成效率是衡量合成型光纤激光功率提升性能好坏的一个重要指标。在搭建锁相实验光路前(图 1 阴影部分所示),在光纤激光器的准直器外加上输出镜 M1(对信号光反射率 20%)作为光纤激光器的输出腔镜。精密调节光路,使 M1 与 FBG 形成谐振,实现两路光纤激光的稳定输出,当输出功率达到最高时,激光器达到了最佳的谐振状态。此时测得的输出功率为锁相前激光阵列的原始输出功率 P_0 。在最高抽运电流时,其最高输出功率为 9.4 W。

当两路激光锁相运行时,测得此时的输出功率随抽运电流的变化曲线,即为相干合成输出功率 P ,则功率合成效率为

$$\eta = \frac{P}{P_0} \times 100\% \tag{2}$$

从图 4 中可以看到,两路光纤激光通过角锥互注入锁定之后,最大输出功率可以达到 8.6 W,相应的功率合成效率达到 91.4%,在电流从 1 A 增大到 7.5 A 的稳定输出过程中,功率合成效率基本稳定在 90%左右。

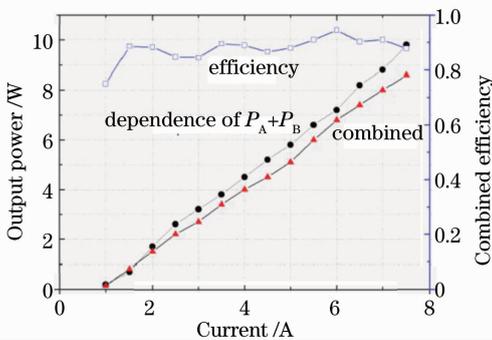


图 4 激光器合成前后能量变化及合成效率图

Fig. 4 Output power comparison the coherent combined with the individual and combined efficiency

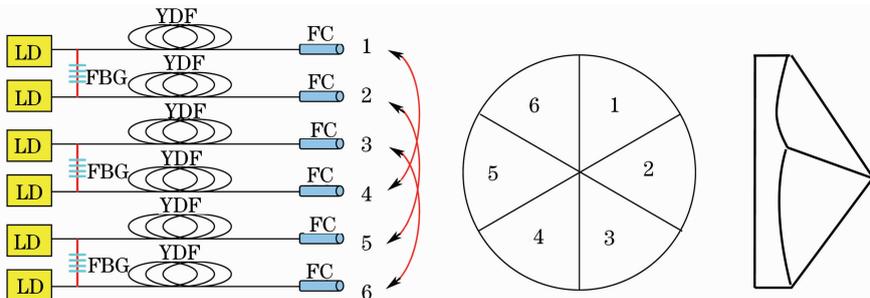


图 6 多个光纤激光器的相干合成示意图

Fig. 6 Schemagic diagram of multi fiber lasers coherent combining

3.3 合成光谱

为了更加精细地反映出两路激光在通过角锥互注入时波长和相位的锁定情况,采用 YOKDGAWA 公司的 AQ6370 型光纤光谱仪来监测锁相波长。

图 5 是抽运电流在 2.0 A 时的锁相光谱图。从图中可以看出,通过角锥互注入锁相之后的谱线中心在 1085 nm,且谱线稳定,说明两路激光通过能量的相互注入达到了自组织锁相。从图中还可以看出锁相激光谱线线宽约 2 nm,为宽谱输出,可见该方案对光纤激光器的频率模式要求不高,不需要窄线宽输出激光器也能实现相干合成。

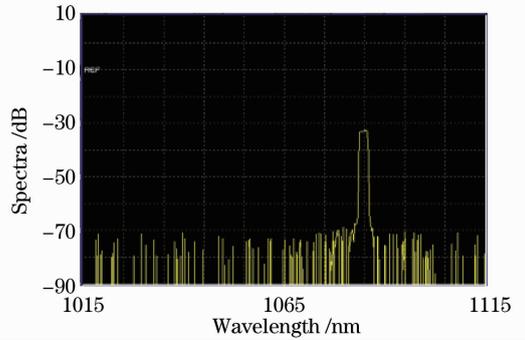


图 5 光纤激光互注入锁定光谱

Fig. 5 Spectra under the conditions of mutual injection-locked

3.4 多个光纤激光器的相干合成

本文所报道的方法获得了高的条纹对比度和功率合成效率,且避免了 MOPA 结构复杂的相位控制系统,相对于其他被动锁相结构,具有结构简单,合束效率高,相干性好,可定标放大的优点。图 6 为采用该技术并结合文献[16]的结果得到的多路激光相干合成的一种可行方案示意图。

角锥的 3 条棱及其像将角锥棱镜分成 6 个两两对称的部分,垂直射入两两对称部分的激光通过角锥棱镜可以实现完全互注入。对于图 6 所示的 3 组关联激光器,FL1 和 FL2 通过尾部 FBG 关联,FL2

和 FL5 通过角锥棱镜对称反射实现完全互注入; FL5 和 FL6 又通过尾部 FBG 关联, FL6 和 FL3 又通过角锥实现完全互注入; FL3 和 FL4 通过尾部 FBG 关联, FL4 和 FL1 通过角锥实现互注入。通过角锥可以实现 3 组 6 路关联光纤激光之间相互注入锁定, 通过偏振片偏振耦合输出, 可获得 6 路激光相干输出。

4 结 论

设计了一种双端输出的光纤激光器, 两路光纤激光尾端通过反射率为 85% 的 FBG 连接, 使其有一定的相互关联, 在外部利用角锥反射器使能量相互注入实现自组织锁相相干合成, 利用偏振片分光使其偏振输出。分别从光强分布、合成效率和光谱 3 个方面考察了相干合成的效果。从实验结果可以看出, 干涉条纹的可见度达到了 0.92; 功率合成效率约为 90%; 互注入锁相光谱稳定。说明了该结构实现了互注入锁相相干合成输出。相比较其他方案, 利用角锥退偏反射实现互注入, 增大了互注入量, 提高了锁相程度。利用偏振片分光使随机偏振输出的激光器在锁相之后偏振输出, 能够得到很高的条纹可见度。从实验中还可以看出该方案对激光器要求较低, 锁相系统均为能够承受大功率的光学元件, 且可以扩展到多路, 具有结构简单, 易于实现, 扩展性好等特点, 为高功率光纤激光相干合成提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- 1 Lei Bing, Feng Ying, Liu Zejin *et al.*. Study and development of coherent addition techniques of laser beam [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2007, **24**(4): 407~414
雷 兵, 冯 莹, 刘泽金等. 激光束相干合成技术的研究进展 [J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(4): 407~414
- 2 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 77~81
程 勇, 刘 洋, 许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 77~81
- 3 Wang Wei, He Bing, Li Zhen *et al.*. Experimental study on coherent beam combination in lasers array in different duty ratios [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1007~1011
王 伟, 何 兵, 李 震等. 占空比对相干组束影响的实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1007~1011
- 4 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 323~326

- 李立波, 楼祺洪, 周 军等. 弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 323~326
- 5 Liu Zejin, Hou Jing, Xu Xiaojun *et al.*. Reserch progress of laser beam combining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2773~2779
刘泽金, 侯 静, 许晓军等. 激光相干合成的研究进展 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2773~2779
- 6 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing *et al.*. Beam quality of partially coherent combining of laser array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1066~1070
周 朴, 王小林, 马阎星等. 激光阵列部分相干合成的光束质量 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1066~1070
- 7 Wang Huisheng, Liu Yang, Wei Shangfang *et al.*. Coherent combination of Michelson cavity fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1845~1850
王会升, 刘 洋, 韦尚方等. 迈氏腔光纤激光器的相干合成 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 1845~1850
- 8 C. J. Corcoran, F. Durville. Power scaling a coherent laser array [C]. *Annual Solid State and Diode Laser Technoligy Rebiw*, 2008
- 9 L. P. Liu, Y. Zhou, F. T. Kong *et al.*. Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(21): 4829~4837
- 10 J. Li, K. Duan, Y. Wang *et al.*. High-power coherent ceam combining of two photonis crystal fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Lett.*, 2008, **20**(11): 888~890
- 11 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
- 12 E. J. Bochove, S. A. Shakir. Analysis of a spatial-filtering passive fiber laser beam combining system [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 320~327
- 13 Y. Huo, P. K. Cheo. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**: 2345~2349
- 14 Chen Zilun, Hou Jing, Zhou Pu *et al.*. Mutual injection locking of two individual fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7046~7050
陈子伦, 侯 静, 周 朴等. 两个光纤激光器的互相注入锁定 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 7046~7050
- 15 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. 100 kW level LD pumped coherent laser array system [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2010, **47**(1): 011402
刘泽金, 周 朴, 许晓军. 对百千瓦级全固态激光相干阵列系统的分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011402
- 16 Liu Yang, Cheng Yong, Xu Lixin *et al.*. Mutual injection phase-locking of two double clad fiber lasers [J]. *Acta Physics Sinica*, 2009, **58**(6): 3929~3933
刘 洋, 程 勇, 许立新等. 两路双包层光纤激光器互注入锁相实验研究 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(6): 3929~3933
- 17 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
- 18 L. Fabiny, P. Colet, R. Rajarshi *et al.*. Coherence and phase dynamics of spatially coupled solid-state lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(5): 4287~4296
- 19 J. R. Terry, K. S. Thornburg, D. J. Deshazer *et al.*. Synchronization of chaos in an array of three lasers [J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **59**(4): 4036~4043