

频率漂移对耦合激光器阵列锁相状态的影响

曹润秋 陆启生 许晓军 侯 静

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 耦合激光器阵列可以通过激光器之间的倏逝波耦合实现相位锁定, 是有望实现光束相干合成的方案之一。为了探究该阵列锁相状态的稳定性, 分析了频率漂移对两路激光器阵列相位锁定状态的影响。通过对耦合激光器阵列动力学方程的数值研究发现, 频率漂移将破坏激光器阵列的锁相状态, 并引入相位噪声, 导致输出远场光强分布不稳定; 研究还发现: 倏逝波耦合能够对频率漂移的影响起到一定的抑制作用, 但这种抑制只在频率漂移较弱时才有效, 因此, 如果将该阵列用于光束合成, 加入相应的抗干扰措施还是很必要的。数值分析的结果还表明: 频率漂移的低频成分对于阵列相位锁定状态的影响更为剧烈, 因此, 抗干扰措施应主要针对低频干扰来进行。

关键词 激光器; 固体激光器; 激光器阵列; 频率漂移; 相位锁定; 相位噪声

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0084

Influence of Frequency Drift on Phase-Locked State of Coupled-Laser Arrays

Cao Jianqiu Lu Qisheng Xu Xiaojun Hou Jing

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Coupled laser array, which realizes phase locking of elementary lasers with evanescent waves coupling, is a promising scheme to realize coherent beam combination. To reveal the stability of the phase-locked state in the array, the influence of the frequency drift on the phase dynamics of the two-coupled-laser array is researched. It is demonstrated that the frequency drift will break up the phase-locked state of the laser array and induce the spatial instability of the far-field intensity due to phase noise. It is also found that although the evanescent coupling between elementary lasers can restrain these effects to some extent, the restrainability is too limited to be effective when the frequency drift is relatively strong. It is suggested that some anti-jamming protections should be applied to the array, especially in the atrocious environment. Furthermore, the phase-locked state of the array is more sensitive to the low-frequency component of the frequency drift. Therefore, the protections should pay more attention to the low-frequency jamming.

Key words lasers; solid-state lasers; laser array; frequency drift; phase-locked state; phase noise

1 引 言

激光器阵列的相干合成技术作为实现高功率相干光源的有效途径之一, 已被应用于各类激光器, 如: CO₂ 激光器阵列、半导体激光器阵列等^[1]。与其它激光器相比, 固体激光器显得体积更小、结构更紧凑, 因而备受关注^[2,3]。

激光器阵列相干合成技术的关键之一, 就是阵

列中的子光束之间要具有稳定的相位关系。但是由于各子激光器之间的差异以及对外界环境变化的响应不同, 使得各子激光器在独立运行时产生相位噪声, 导致光束之间无法形成稳定的相位关系。因此, 要实现阵列的相干合成, 就需要对各子光束进行相位锁定^[1,2], 使激光器阵列在锁相的状态下运行。

现阶段针对耦合激光器阵列已经开展了很多研

基金项目: 国防预研基金(51326010207)资助课题。

作者简介: 曹润秋(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器相干合成方面的研究。E-mail: jq_cao@126.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 教授, 主要从事激光器以及激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

究^[2~16],但是当干扰增强时,阵列的相位动力学过程会受到怎样的影响,阵列的抗干扰性能够达到一种怎样的程度;却少见相关报道。本文的研究就是基于这些问题开展起来的。

激光器受到干扰的主要表现之一就是频率漂移,任何能够改变谐振腔腔长或腔内介质折射率的因素均能导致频率漂移^[17],频率漂移也是激光器阵列中相位噪声的主要来源之一。因此,本文着重分析了频率漂移对于耦合激光器阵列相位锁定状态的影响。与文献[2]相同,本文仍然选用两路激光器阵列作为研究对象,因为两路激光起阵列能够反映此类阵列的共性问题,同时能够使模型简化、便于分析。

2 理论基础及相关参量简介

对于相互耦合的两路单模固体 Nd:YAG 激光器阵列的动力学过程可以描述为^[2~4]

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [(G_1 - \alpha_1)E_1 - \kappa E_2] + i\omega_1 E_1, \quad (1)$$

$$\frac{dG_1}{dt} = \frac{1}{\tau_f} (p_1 - G_1 - G_1 |E_1|^2), \quad (2)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [(G_2 - \alpha_2)E_2 - \kappa E_1] + i\omega_2 E_2, \quad (3)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = \frac{1}{\tau_f} (p_2 - G_2 - G_2 |E_2|^2), \quad (4)$$

式中 τ_c 为光在腔内往返一次所需的时间, τ_f 为 Nd³⁺ 离子上能级荧光寿命, κ 为两个激光器之间的耦合强度, p_j 和 α_j 为抽运和损耗系数, ω_j 为失谐量, 如果考虑频率漂移, $\omega_j = \omega_{0j} + \delta\omega_j(t)$, 其中, ω_{0j} 为平均失谐量, 是一个常数, 而 $\delta\omega_j(t)$ 为由于频率漂移导致的随时间变化的失谐量。

若假设

$$E_j(t) = \sqrt{I_j(t)} \exp[i\varphi_j(t)], \quad (5)$$

式中 $I_j(t)$ 和 $\varphi_j(t)$ 分别表示光场 $E_j(t)$ 的强度和相位。将(5)式代入(1)式~(4)式中,可以得到

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{2}{\tau_c} [(G_1 - \alpha_1)I_1 - \kappa \sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi], \quad (6)$$

$$\frac{dG_1}{dt} = \frac{1}{\tau_f} (p_1 - G_1 - G_1 I_1), \quad (7)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{2}{\tau_c} [(G_2 - \alpha_2)I_2 - \kappa \sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi], \quad (8)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = \frac{1}{\tau_f} (p_2 - G_2 - G_2 I_2), \quad (9)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \Delta\omega + \frac{1}{\tau_c} \left(\sqrt{\frac{I_1}{I_2}} + \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \right) \kappa \sin \Phi, \quad (10)$$

式中 $\Phi = \varphi_2 - \varphi_1$ 为两光场的相位差, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$

为两激光器之间的失谐差。这里假设两激光器的抽运和损耗系数是一致的(这在实验中是可以实现的^[4]),那么(6)式同(8)式具有相同的解(即 $I_1 = I_2 = I$),此时,两路激光器的光强是同步的,相位差 Φ 的方程可以简化为

$$\frac{d\Phi}{dt} = \Delta\omega + 2\tau_c^{-1} \kappa \sin \Phi, \quad (11)$$

如果考虑频率漂移,失谐差 $\Delta\omega$ 应该改写为

$$\Delta\omega(t) = (\omega_{02} - \omega_{01}) + [\delta\omega_2(t) - \delta\omega_1(t)] = \Delta\omega_0 + \delta\omega_{21}(t), \quad (12)$$

式中 $\Delta\omega_0$ 为平均失谐差, $\delta\omega_{21}(t)$ 为由于频率漂移导致的失谐差起伏。从(12)式可以看出频率漂移是通过引入失谐差起伏来影响激光器阵列的动力学特性的。考虑到频率漂移的随机性,由其产生的失谐差起伏也将是随机的,这给分析带来了一定的困难。幸运的是,通过傅里叶变换,可以得到失谐差起伏的频谱。通过分析阵列相位动力学过程对不同频谱分量的响应,就可以揭示频率漂移对阵列锁相状态的影响。同时,这种处理的另一个优点,就是可以分析不同频谱分量对于阵列锁相状态影响的差异。因此,若只考虑频率为 Ω 的频谱分量,则(12)式应该写为

$$\Delta\omega(t) = \Delta\omega_0 + m \sin(2\pi\Omega t), \quad (13)$$

式中 m 为该频谱分量的振幅,表示频谱分量的强度。在数值模拟过程中,假设 $\Delta\omega_0$ 为 0 以消除其对阵列动力学过程的影响^[2]。这样,通过求解(6)式~(9)式,(11)式,(13)式,就可以得到相位差 Φ 随时间的变化过程,从而揭示该频谱分量(即频率漂移)对于激光器阵列锁相状态的影响。模拟中所用参量如表 1 所示。

表 1 模拟中所用的参量^[4], τ_c 对应 6 cm 的激光器腔长, τ_f 对应于 1064 nm 的激光输出

Table 1 Parameters used in the simulation^[4]. τ_c is for the cavity of 6 cm length, τ_f is for the 1064 nm laser output

Parameters	α	p	κ	τ_c	τ_f
Values	0.04	1.33 α	2×10^{-5}	0.45 ns	240 μ s

3 结果及讨论

对应于不同频谱分量的相位差随时间的变化如图 1 所示。从图中可以看出,由于这些频谱分量的影响,两激光光场的相位差已经不再是一个常数,而是随时间变化;这与无干扰的情况是不同的,在没有干扰时,两光场的相位差应锁定为 π 。该结果表明:频率漂移将会影响阵列的锁相状态。

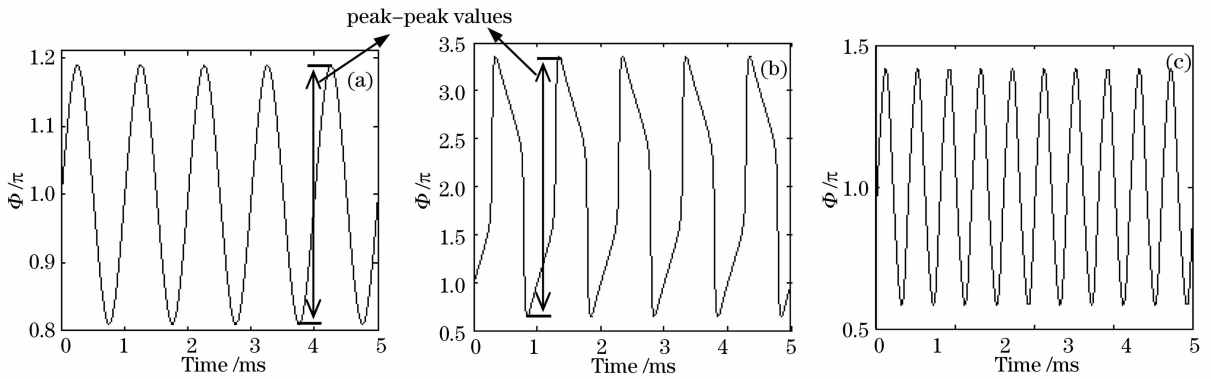


图 1 对应于不同频谱分量的相位差 Φ 的变化曲线。(a)对应于 $\Omega=1$ kHz, $m=5 \times 10^4$ rad/s 的频谱分量, (b)对应于 $\Omega=1$ kHz, $m=10^5$ rad/s 的频谱分量, (c)对应于 $\Omega=5$ kHz, $m=5 \times 10^4$ rad/s 的频谱分量

Fig. 1 Evolutions of the phase differences corresponding to different frequency components of the detuning fluctuation.

(a) $\Omega=1$ kHz, $m=5 \times 10^4$ rad/s, (b) $\Omega=1$ kHz, $m=10^5$ rad/s, (c) $\Omega=5$ kHz, $m=10^5$ rad/s

从图 1 中还可以发现,相位差是随时间周期变化的,而且其变化频率和相应的频谱分量的频率是一致的,这说明失谐差起伏的频谱分量将导致与其同频的相位差变化。比较图 1(a)和图 1(b),可以看出:随着频谱分量强度的增加,相位差变化的峰峰值 (peak-peak values) 也会增加。通过比较图 1(b)和图 1(c),还可以看出,对于相同强度的频谱分量,相位差变化的峰峰值随着频率的增加而有所下降。后两种变化趋势可以在图 2 中更为清晰地表现出来。

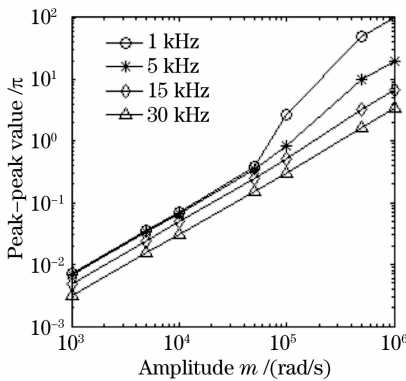


图 2 相位差变化的峰峰值与不同频谱分量强度之间的关系

Fig. 2 Peak-peak value of the phase difference versus amplitude with to different Fourier components of the detuning fluctuation

从图 2 可见,峰峰值随着频谱强度的增强而单调增加,这表明频率漂移越强,对阵列锁相状态的影响也越剧烈。同时,对于相同强度的不同频谱分量,峰峰值随着频率的增加而有所降低,这说明耦合激光器阵列的锁相状态对于频率漂移的低频分量更为敏感。

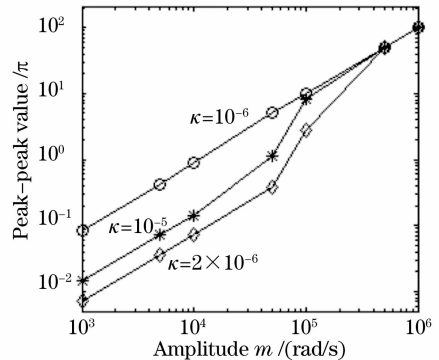


图 3 激光器之间耦合系数不同时,相位差的峰峰值随频率强度的变化 ($\Omega=1$ kHz)

图 3 Peak-peak value of the phase difference versus amplitude for different coupling strengths ($\Omega=1$ kHz) 趋势。从图 3 可见,随着耦合系数的增加,相位差变化的峰峰值有所下降,这说明,通过两激光器之间的倏逝波耦合,能够对频率漂移的影响起到一定的抑制作用。同时,从图中还可以看出:对应于不同的频谱强度,由不同耦合系数造成的峰峰值改变程度也是不同的,当 m 小于 10^5 rad/s 时,峰峰值随耦合系数的变化较为明显,而当 m 进一步增大时,峰峰值随耦合系数变化的程度就大大减弱;这说明:倏逝波耦合对于频率漂移影响的抑制能力是有限的,但频率漂移较弱时,倏逝波耦合能够对其影响进行有效的抑制,从而使得阵列实现较好的锁相输出,但是,当频率漂移较为剧烈时,倏逝波耦合就无法对其影响进行有效的控制了。这也表明:虽然该阵列在实验室中能够得到较好的锁相输出模式,但是,当该阵列所处的环境比较复杂,受到的干扰相对较强时,将无法得到稳定的锁相模式输出。

这里需要强调的是:频率漂移的影响是包括所

图 3 给出了对应于不同耦合系数的峰峰值变化

有频谱分量的综合结果,也就是说,频率漂移引起的相位差的变化应该是所有频谱分量导致的相位差变化的总和。考虑到频率漂移的随机特性,由其导致的相位差变化也应该是随机的,因此,频率漂移的影响就是在阵列中引入了相位噪声。

4 对阵列远场模式的相关影响

对于激光器阵列来说,输出的远场光强分布是一个非常重要的物理量。文献[2]的研究表明,如果不

考虑干扰因素的影响,两个固体激光器相互耦合能够得到相位差 π 的锁相状态,对应于稳定的反相远场模式输出[如图 4(c)所示]。但是,如果考虑频率漂移的影响,阵列中就会存在相位噪声。本节将这种相位噪声对于远场光强分布的影响进行简要的讨论。

首先对不同的相位差对应的远场光强分布进行分析。由于阵列中的两个子激光器都是基横模运行,因此子光束设为高斯光束,则第 j 个光束的光场可以表示为

$$U_j(x, y) = \exp[i(kz + \varphi_j)] \exp\left\{ip(z) + \frac{ik}{q(z)}[(x - x_{0j})^2 + (y - y_{0j})^2]\right\}, \quad (14)$$

$$p = i \ln \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \sigma_0^2}\right)^2} - \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi \sigma_0^2}\right), \quad q = z - i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}, \quad (15)$$

式中 (x_{0j}, y_{0j}) 是第 j 各子光束的中心位置坐标, σ_0 表示高斯光束的斑斑半径。按照夫琅禾费衍射理论,阵列输出的远场分布为^[18]

$$U_i(x_i, y_i) = \frac{\exp(jkz) \exp[j(k/2z)(x_i^2 + y_i^2)]}{j\lambda z} F\left\{\sum_{j=1}^2 U_j(x, y)\right\}_{f_x = \frac{x_i}{\lambda z}, f_y = \frac{y_i}{\lambda z}}, \quad (16)$$

式中 (x, y) 和 (x_i, y_i) 分别是近场平面 ($z = 0$) 和远场平面的坐标, k 和 λ 分别表示光场的波矢和波长, $F\{\dots\}$ 为二维傅里叶变换算符, φ_j 为光场的相位。由于这里只关心相位差 $\Phi = \varphi_2 - \varphi_1$ 的影响,因此,假设 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \Phi$ 。

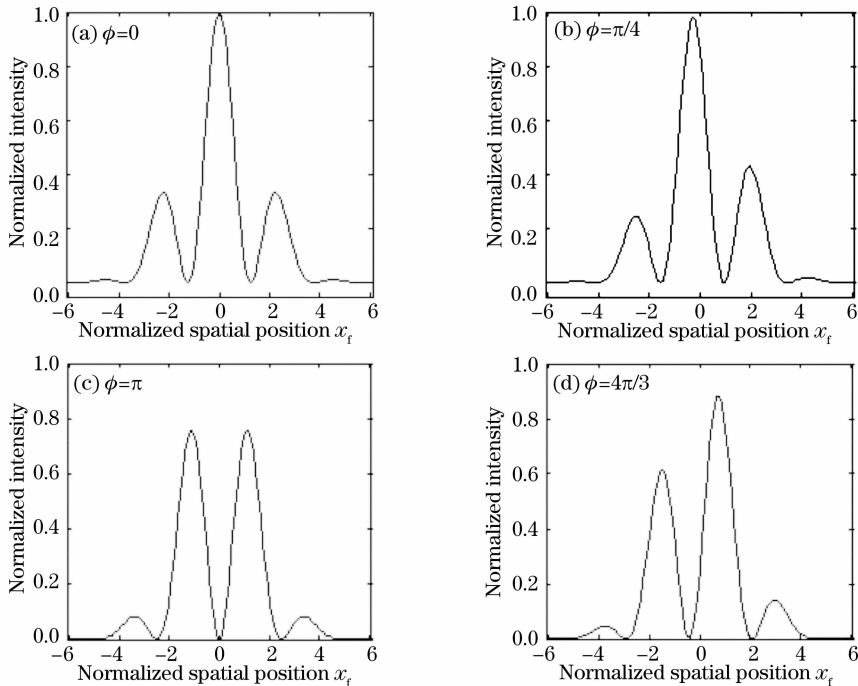


图 4 对应于不同相位差 Φ 的远场光强分布图

Fig. 4 Far-field intensity profile versus phase difference Φ

两光束的相对位置如图 5 所示,对应于不同相位差的远场光强分布由图 4 给出。从图 4 中可以看出:相位差的变化,会使得远场光强的峰值位置和大

小发生改变。因此,可以想象:当相位差是由频率漂移引起的相位噪声时,远场光强分布将随时间不规则地变化。这也表明,频率漂移将导致远场光强分

布的不稳定。

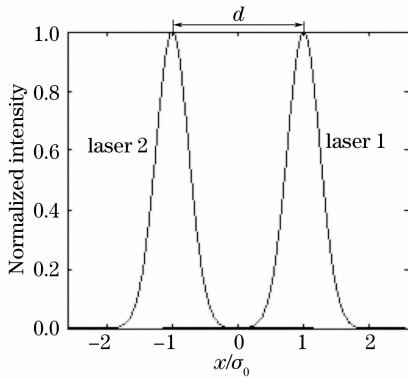


图 5 两光束相对位置示意图,两光束之间的距离为

$$d = 2\sigma_0$$

Fig. 5 Relative positions of two beams, with distance of

$$d = 2\sigma_0$$

5 结 论

通过数值模拟,分析了频率漂移对于两路耦合固体激光器阵列锁相状态的影响。分析表明:频率漂移会导致阵列中相位噪声的出现,从而使得远场光强分布不再稳定。同时还发现,激光器间的倏逝波耦合能够对频率漂移的影响起到一定的抑制作用;但是当频率漂移较强时,这种抑制效果将不再显著。这说明:当耦合激光器阵列应用于较为复杂的环境时,将无法得到稳定的远场分布,因此,相应的抗干扰措施还是非常必要的。研究表明:该阵列对于频率漂移的低频成分较为敏感,因此,抗干扰措施应主要针对低频扰动进行。在此,还需要说明的是,虽然本研究是针对两路激光器阵列进行的,但是,在多路耦合激光器阵列中也存在类似的现象,因为从分析过程中可以看出:只要频率漂移存在,就会导致阵列中子激光器之间的失谐差起伏,这必将对阵列的锁相状态造成影响;而且,倏逝波耦合对于这种影响的抑制作用也是有限的,但是,对于多路激光器阵列,这种抑制作用能够达到怎样的程度,还有待进一步研究。

参 考 文 献

1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577

2 L. Fabiny, P. Colet, R. Roy. Coherent and phase dynamics of spatially coupled solid-state array[J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(5): 4287~4296

3 Y. Braiman, T. Kennedy, K. Wiesenfeld *et al.*. Entrainment of solid-state arrays[J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(2): 1500~1506

4 K. Thornberg, Jr. M. Moller, R. Roy. Chaos and coherence in coupled lasers[J]. *Phys. Rev. E*, 1997, **55**(4): 3865~3869

5 J. Terry, K. Thornburg, Jr., D. DeShazer *et al.*. Synchronization of chaos in an array of three lasers[J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **59**(4): 4036~4043

6 Sun Jian, Zhu Shique. Chaotic synchronization of intensities and phases in two multi-mode laser fields[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(5): 743~748

孙 坚, 朱士群. 两台多模激光场强度和相位的混沌同步[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(5): 743~748

7 Sun Jian, Zhu Shique. Chaotic synchronization of intensities in three multimode lasers[J]. *J. Suzhou University (Natural Science Edition)*, 2004, **20**(2): 52~57

孙 坚, 朱士群. 三台多模激光强度的混沌同步[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2004, **20**(2): 52~57

8 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

9 D. Sabourdy, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot *et al.*. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(2): 87~97

10 A. Shirakawa, T. Saitou, T. Sekiguchi. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(21): 1167~1172

11 A. Shirakawa, K. Matsuo, K. Ueda. Fiber laser coherent array for power scaling, bandwidth narrowing, and coherent beam direction control[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5709**: 165~174

12 M. Minden, H. Bruesselbach, J. Rogers *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5335**: 89~97

13 H. Bruesselbach, M. Minden, J. Rogers *et al.*. 200 W self-organized coherent fiber arrays[C]. *CLEO*, 2005, **1**(CMDD4): 532~534

14 H. Bruesselbach, D. Cris Jones, Metin S. Mangir *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1339~1341

15 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726

16 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers[J]. *Chin. 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

17 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. *Laser Principle* [M]. 4th edition, Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 214~221

周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 第四版, 北京: 国防工业出版社, 2000. 214~221

18 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 287~290