

角锥腔脉冲固体激光器互注入锁相实验研究

杨卓^{1,2} 程勇^{2*} 卢常勇² 刘秉琦¹ 朱孟真²

(¹ 军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)
(² 武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075)

摘要 相干合成技术是获得高功率、高亮度激光输出的有效途径之一。互注入锁相是获得相干合成的被动方式。理论分析与仿真模拟了角锥的相干特性,提出了基于角锥棱镜的脉冲固体激光束相干合成方案。开展了两路脉冲固体激光束相干合成和六路脉冲固体激光束相干合成的实验研究。得到了超过 255 mJ 的合成激光输出,功率合成效率接近 80%,可见度约为 0.5。研究表明,该方法结构简单,是获得多路激光相干合成输出的有效方案。

关键词 激光器;相干合成;互注入锁相;角锥棱镜

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.101402

Mutual Injection Phase Locking of Solid-State Lasers with Corner-Cube Cavity

Yang Zhuo^{1,2} Cheng Yong² Lu Changyong² Liu Bingqi¹ Zhu Mengzhen²

(¹ Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)
(² Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075, China)

Abstract Coherent combination of laser arrays is an effective way to achieve high-brightness laser beam. Mutual injection phase locking is a passive way of coherent combination. Theoretical analysis and simulation of the coherent properties of the corner cube are done. The scheme to coherently combine beams from pulsed solid state lasers with corner cube cavity is proposed. The experiments to coherently combine two and six beams from pulsed solid state lasers are performed. The output energy is more than 255 mJ with the power combination efficiency of approximately 80% and visibility of about 0.5. The simple structure is efficient to achieve coherent combination of laser beams.

Key words lasers; coherent combination; mutual injection phase locking; corner cube

OCIS codes 140.3290; 140.3520

1 引言

相干合成技术是指激光器采用多模块结构,控制各单元(孔径)激光器输出光束的相位达到锁相输出,实现光束的相干合成^[1]。相干合成技术可以得到高功率高亮度激光输出,是目前国内外激光技术领域的热点研究课题。相干合成技术按单元激光器相位锁定的方式分为主动锁相相干合成和被动锁相相干合成两种。主动相位控制利用反馈系统与相位控制元件实现对各子光束的相位控制,如主振荡器功率放大(MOPA)^[2~4]方案。被动相位控制是指各单元激光器在复合腔中通过能量相互注入耦合互相影响,自组织出公共模实现相位锁定,如倏逝波耦合^[5]、迈克耳孙腔耦合^[6~9]和自成像腔耦合^[10~12]等。目前研究主要集中在多路连续光纤激光器的相干合成,而对多路脉冲固体激光器的相干合成研究不多。虽然固体激光器的占空比比光纤激光器大不利于合成,但脉冲固体激光器可具有较大的聚焦功率密度,在工业和军事领域有着

收稿日期: 2012-06-18; 收到修改稿日期: 2012-06-20; 网络出版日期: 2012-07-20

作者简介: 杨卓(1988—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: student.yz@163.com

导师简介: 刘秉琦(1962—),男,博士,教授,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: liubingqi930@sina.com

* 通信联系人。E-mail: cy@jxsg.net

广泛的应用需求。

本课题组在研究“免调试固体激光器”的过程中发现近场呈圆对称分布的六路激光束在远场的分布与六路激光束的相干合成远场分布非常相似。本文对这一现象开展了理论分析与仿真,进行了角锥腔多路脉冲固体激光器相干合成的实验研究。实现了两路激光的相干合成输出和六路激光的部分相干合成输出。观察到可见度约为 0.5 的干涉条纹,获得 255 mJ 的合成激光输出,合成效率接近 80%。

2 理论分析与仿真

角锥棱镜对均匀入射的平面波反射时,不改变其方向、相位、振幅,也与反射次序无关,具有相位共轭的作用。角锥的三个反射面和棱边将激光束分割成空间上对称分离的六路激光束。六路激光束通过角锥反射后,对称两路之间相互注入锁相自组织相干。文献[13~15]解释了互注入相干合成的原理,给出了单模条件下各激光器光场和增益的缓变方程:

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

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

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

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

式中 E 为激光器内的光场, G 为增益系数, a 为衰减系数, κ 为两个激光器光场之间的耦合系数, p 为抽运系数, ω 为激光器的运转频率, τ_c 为光子在谐振腔内往返一次所需的时间, τ_f 为上能级粒子的自发辐射寿命。

令 $E_1 = X_1 \exp(i\varphi_1)$, $E_2 = X_2 \exp(i\varphi_2)$, 其中 X 和 φ 分别代表光场的振幅和相位,代入(1)~(4)式,并分离等式两边的实部和虚部,可得

$$\frac{dG_1}{dt} = \tau_f^{-1}(p_1 - G_1 - G_1 X_1^2), \quad (5)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \tau_c^{-1}[(G_1 - a)X_2 - \kappa X_1 \cos \Delta\varphi], \quad (6)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = \tau_f^{-1}(p_2 - G_2 - G_2 X_2^2), \quad (7)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = \tau_c^{-1}[(G_2 - a)X_1 - \kappa X_2 \cos \Delta\varphi], \quad (8)$$

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = \kappa\tau_c^{-1}\left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_2}{X_1}\right)\sin \Delta\varphi + \Delta\omega, \quad (9)$$

式中 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ 分别表示两个激光器之间的相位差和运转频率差。(5)~(9)式描述了两个激光器通过能量相互注入达到自组织锁相的时间演化过程。能否实现自组织锁相,关键就在于(9)式描述的相位差能否恒定。假设抽运源、增益介质等元件的参数完全相同,可认为两路激光器的抽运系数、增益系数、衰减系数和光强振幅都相等。令 $E_i = X_i \exp(i\varphi_i)$, $i = 1, 2$, 则有 $X_1 = X_2$, $G_1 = G_2$ 。将(9)式化简可得

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = 2\kappa\tau_c^{-1}\sin \Delta\varphi_{1,2} + \Delta\omega. \quad (10)$$

当 $\Delta\omega$ 满足 $\Delta\omega \leq 2\kappa\tau_c^{-1}$ 时,两路激光器的相位能随时间变化收敛于一个固定值(0, π 或 $-\pi$),实现两路激光器的相位锁定。对于工作介质、腔长、抽运源均相同的激光器,容易满足频率差的理论要求,使用角锥使能量互注入后,便能实现相位锁定。

用计算机仿真使用角锥互注入锁相前后激光合成的远场分布。用能量叠加模拟未锁相的两路激光合成分布,得到的结果如图 1 所示。用振幅叠加模拟锁相的两路激光合成分布,得到的结果如图 2 所示。未锁相的两路激光在远场合成呈高斯分布,是典型的非相干合成分布。锁相的两路激光在远场呈清晰的明暗条纹,为相干合成,由可见度计算公式 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 得可见度为 1。

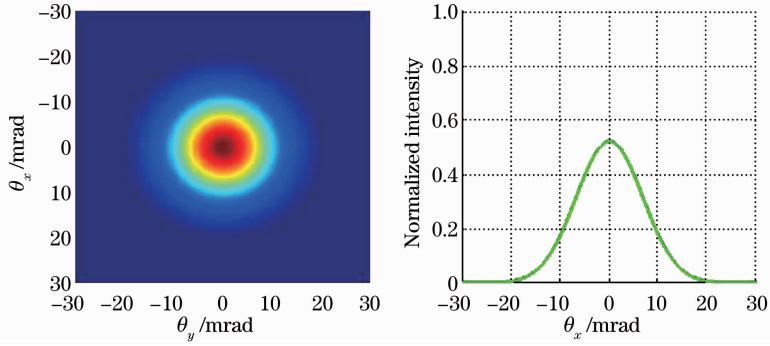


图 1 未锁相的两路激光合成仿真

Fig. 1 Simulation of the far-field profile of combined two phase-unlocked beams

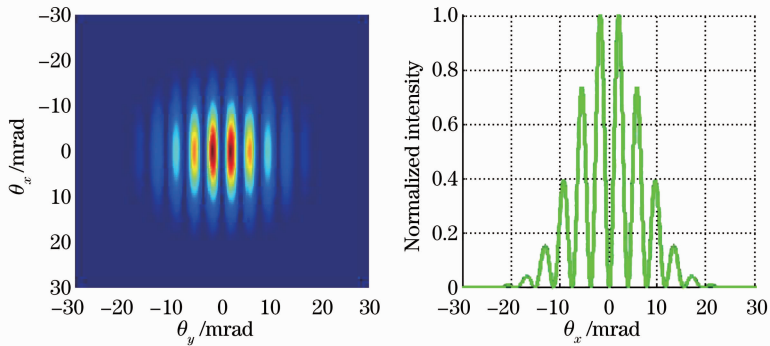


图 2 锁相的两路激光相干合成仿真

Fig. 2 Simulation of the far-field profile of combined two phase-locked beams

模拟六路激光合成的远场分布,锁相的激光束用振幅叠加模拟远场分布,未锁相的激光束使用能量叠加模拟远场分布。未锁相的六路激光合成的远场分布如图 3 所示,呈高斯分布,为典型的非相干合成分布。锁相的六路激光合成的远场分布如图 4 所示,呈点状阵列分布,中心能量集中,主极强峰伴随着六个次极强峰,可见度为 1,六束激光完全相干。对称两路锁相的六路激光合成的远场分布如图 5 所示,也呈点状阵列分布,中心能量集中,主极强峰伴随着六个次极强峰,有一定的可见度,六束激光部分相干。对比图 3~5 对比可知,六束激光部分相干合成比完全相干合成主极强峰的峰值要低,比非相干合成峰值要高。

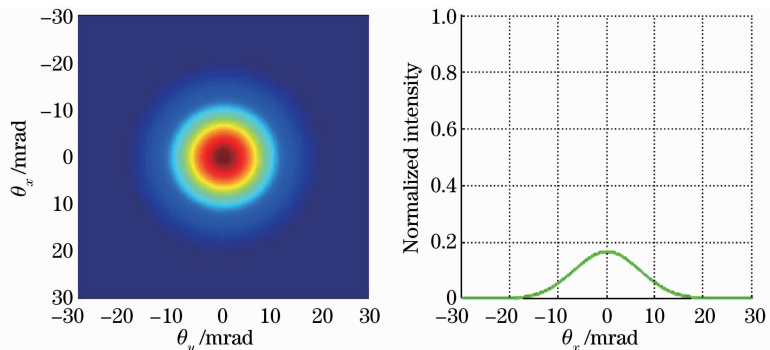


图 3 未锁相的六路激光合成仿真

Fig. 3 Simulation of the far-field profile of combined six phase-unlocked beams

3 实验研究

3.1 实验装置

由于受到实验条件的限制,为了验证上述理论与仿真,设计实验方案如图 6 所示。角锥棱镜和平面输出镜构成谐振腔,Nd:YAG 介质激光棒直径 6 mm,掺杂浓度 1%(原子数分数),两端镀 1064 nm 增透膜,侧面

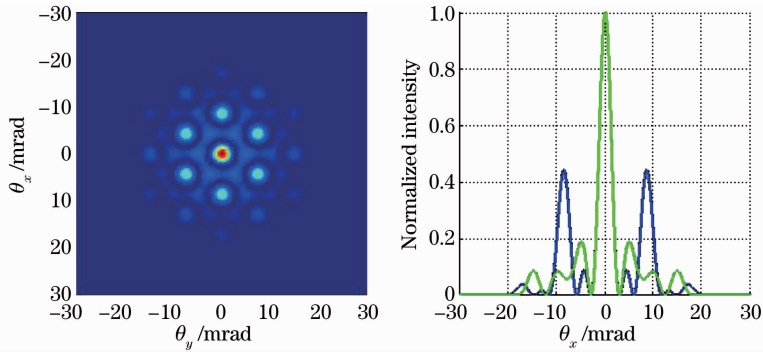


图4 锁相的六路激光合成仿真

Fig. 4 Simulation of the far-field profile of combined six phase-locked beams

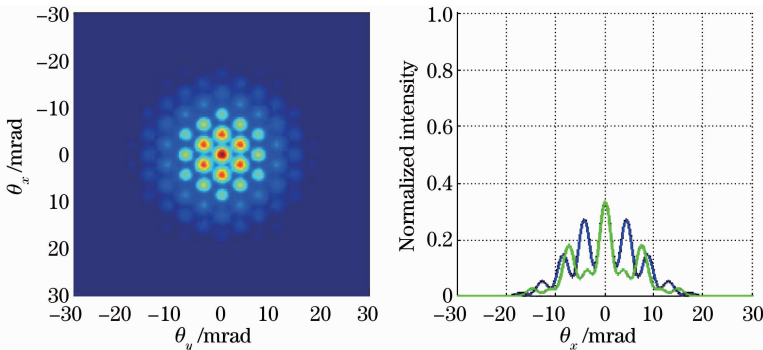


图5 对称两路锁相的六路激光合成仿真

Fig. 5 Simulation of the far-field profile of combined six beams in which every two symmetrical beams are phase-locked

磨毛。采用环形 808 nm 脉冲激光二极管均匀侧面抽运，抽运脉宽 $500 \mu\text{s}$ ，重复频率 1 Hz。在谐振腔中插入一个六孔光阑来模拟腔内的六路激光介质，小孔直径为 1 mm，占空比为 0.5。角锥棱镜的三条棱和它们的像将通过孔径划分为六个扇形区域。六孔光阑中心与角锥底面顶点重合，六个小孔分别对应于角锥棱镜的六个扇形区域。通过放置 CCD 于焦距 1 m 透镜的焦平面上来观察六路激光输出的远场分布。

此实验用同一介质棒模拟六路激光器，激光器介质、腔长均相同，因此纵模间隔相等，六路激光的各频率分别相等，满足锁相的理论前提。对称两路激光通过角锥实现相互注入，由输出镜输出。焦距 1 m 的正透镜将六路激光进行聚焦，由衍射理论可知，其焦点光强分布与激光合成输出的远场分布相似，只是大小按比例缩小。利用 Spiricon 公司的 LBA-FW-SCOR20 型激光光斑分析仪测量六路激光合成后的光强分布。采用 EPM1000 功率能量计测量六路激光合成后的能量大小。

3.2 实验结果与分析

激光阵列的远场光强分布和功率合成效率是激光合成研究的两项重要指标。远场光强分布反映激光阵列的相干程度，条纹越清晰稳定，激光相干度越高。合成效率反映了合成阵列的效费比，功率合成效率越高，激光相干合成阵列的效费比越好。因此，本实验重点研究了方案的远场光强分布和功率合成效率。

3.2.1 对称两路激光合成远场分布

首先保留对称的两个小孔，挡住其余小孔，用平面全反镜挡在角锥棱镜前，抽运电流设置为 80 A，观察平平(pp)腔对称两路激光合成的远场分布。结果如图 7 所示，能量呈高斯分布。然后撤走平面全反镜，使用角锥棱镜实现能量相互注入，观察角锥腔对称两路激光合成的远场分布。如图 8 所示，远场的干涉条纹非常

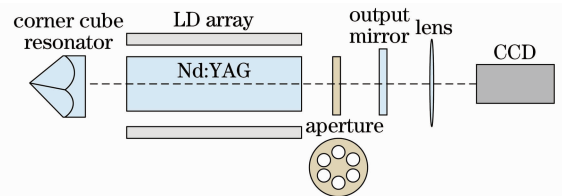


图6 锁相的六路固体激光器相干合成实验结构图

Fig. 6 Schematic of phase-locked coherent combination of 6-beam laser array

清晰。实验结果与仿真结果十分接近,两者的远场分布均呈现出明显的相干条纹。由实验与仿真对比可知,两台原本各自独立工作的激光器通过能量的相互注入,使它们之间的振荡模式相互关联、相互影响,从而达到共同的工作状态,实现了锁相相干输出。

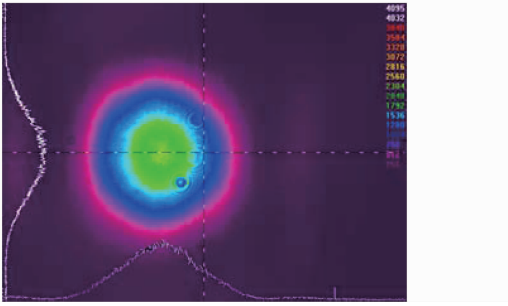


图 7 平平腔两路激光合成的远场分布

Fig. 7 Far-field intensity profile of combined the two beams from plane-parallel (PP) resonator

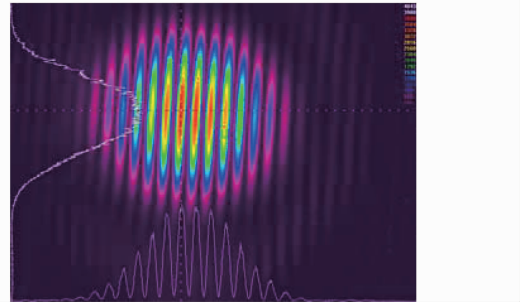


图 8 角锥腔两路激光合成的远场分布

Fig. 8 Far-field intensity profile of combined the two beams from corner-cube resonator

3.2.2 六路固体激光合成远场分布

用平面全反镜挡在角锥棱镜前,抽运电流设置为 80 A,观察平平腔输出六路激光的远场分布,测量结果如图 9 所示。该图案为非相干合成的典型分布,与仿真对比,表明该腔输出的激光为非相干光。撤掉全反镜,使用角锥棱镜,观察角锥腔六路激光的远场分布,测量结果如图 10 所示。远场呈点状分布,中心有一集中的亮斑。按照可见度公式计算得到条纹可见度约为 0.5。

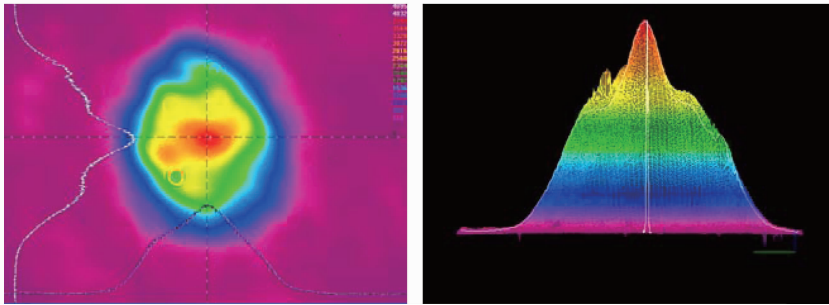


图 9 平平腔六路激光合成的远场分布

Fig. 9 Far-field intensity profile of the combined combined six beams from PP resonator

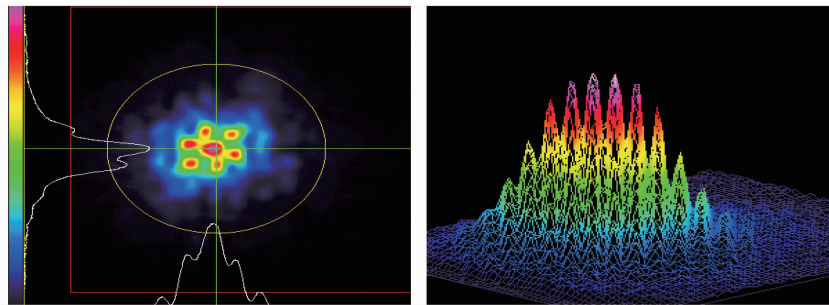


图 10 角锥腔六路激光合成的远场分布

Fig. 10 Far-field intensity profile of the combined six beams from corner-cube resonator

3.3 能量合成效率

相干合成激光阵列的功率合成效率是指在相同的抽运条件下,激光器阵列相干合成后的总体输出功率与激光器阵列在未引入互注入锁相系统前的最大输出功率的比值。采用 EPM1000 功率能量计分别测量角锥腔六路对称互注入结构及相对应的平平腔六路结构的输出能量曲线,再通过对比得到角锥腔六路互注入锁相技术的合束效率,如图 11 所示。当激光器的抽运电流大于 55 A 时,相干合成后的功率合成效率保持在 70% 以上。随着抽运电流的增大,合束效率、输出能量不断提高,当电流达到 90 A 时,合束效率接近 80%。

输出能量达 255 mJ。继续提高抽运电流,还可以进一步提高输出能量。

4 结 论

理论分析与仿真模拟了角锥的相干合成特性。在激光二极管抽运的 Nd:YAG 固体激光器上实现了两路激光完全相干合成输出,六路激光部分相干合成输出,实验结果与理论分析相一致。六路激光相干合成后,远场光斑具有可见度 0.5 的干涉条纹,能量更集中在中心亮斑,功率合成效率接近 80%。实验方案结构简单,是一种可以定标放大的锁相结构,为多光束相干合成提供了一种新思路。

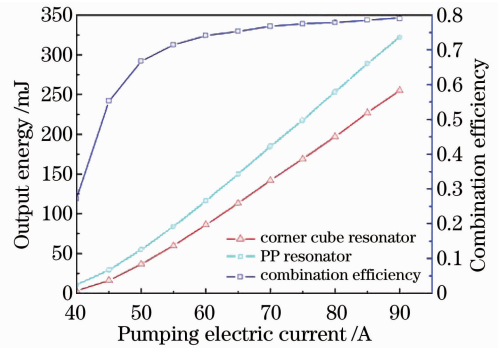


图 11 合束效率图

Fig. 11 Combination efficiency

参 考 文 献

- 1 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(23): 231106
- 2 J. Anderegg, S. Brosnan, E. C. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 3 S. J. McNaught, H. Komine, S. B. Weiss *et al.*. 100 kW coherently combined slab MOPAs[C]. *CLEO*, 2009, CThA1
- 4 T. M. Shay, J. T. Baker, Anthony D. Sanchez *et al.*. High power phase locking of a fiber amplifier array[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71951M
- 5 M. Oka, H. Masuda, Y. Kaneda *et al.*. Laser-diode-pumped phase locked Nd:YAG laser arrays[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 1142~1147
- 6 D. Sabourdy, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot *et al.*. Coherent combining of two Nd:YAG lasers in a Vernier-Michelson-type cavity[J]. *Appl. Phys. B.*, 2002, **75**(4-5): 503~507
- 7 Q. J. Peng, Z. P. Sun, Y. H. Chen *et al.*. Efficient improvement of laser beam quality by coherent combining in an improved Michelson cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(2): 1485~1487
- 8 V. Eckhouse, A. A. Ishaaya, L. Shimshi *et al.*. Intracavity coherent addition of 16 laser distributions[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 350~352
- 9 A. A. Ishaaya, L. Shimshi, N. Davidson *et al.*. Coherent addition of spatially incoherent light beams[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20): 4929~4934
- 10 Y. Zhou, L. P. Liu, C. Eston *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
- 11 S. Menard, M. Vampouille, B. Colombeau *et al.*. Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd:YAG laser beams[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 1996~1998
- 12 S. Menard, M. Vampouille, A. Desfarges-Berthelemot *et al.*. Highly efficient phase locking of four diode pumped Nd:YAG laser beams[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **160**(4-6): 344~353
- 13 K. S. Thornburg, M. Moller Jr., R. Rajarshi *et al.*. Chaos and coherence in coupled lasers[J]. *Phys. Rev. E.*, 1997, **55**(4): 3865~3869
- 14 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
- 15 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