两路相互注入锁定 Nd:YAG 激光器*

李 霄,曹涧秋,周朴,陈子伦,许晓军,赵伊君
(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:通过锁定多模块输出激光相位实现激光功率扩展的相干合成技术是获得高能高光束质量光源的有效途径。本文分析了相互注入锁定相干合成的机理及其对激光器相干性的影响,利用偏振元件将两路独立的 Nd:YAG 激光器关联起来,解决了耦合过程中的损耗问题,实现了两路激光器的相互注入锁定,获得了总功率 4.4W 的部分相干激光输出,长曝光结果表明远场光斑峰值功率密度提高了 1.4 倍,对利用相干合成技术实现高能固体激光器技术进行了初步探索。

关键词:相干合成;相互注入锁定;固体激光器
中图分类号 TN248.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2012)01-0024-04

Mutual injection-locking of two Nd:YAG lasers

LI Xiao, CAO Jianqiu, ZHOU Pu, CHEN Zilun, XU Xiaojun, ZHAO Yijun
(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Coherent beam combining (CBC), used in scaling power by phase-locking multi-lasers, is an efficient approach to achieve high brightness laser. Based on this approach, the current study analyzed the mechanism of mutual injection-locking and its influence to the laser coherence. Furthermore, two independent Nd:YAG lasers were associated with each other by polarized elements, achieving the mutual-injection-locking of two lasers. Coherent laser power reached 4.4W and the peak intensity rosed up to 1.4 factor. Thus , this research made an tentative exploration of the high power coherent beam combining laser.

Key words: coherent beam combine; mutual injection-locking; solid laser

半导体激光器(LD)泵浦固体激光器结构紧凑,性能稳定,在工业、医疗、军事等领域有着广泛应用。然而,高能固体激光器内强烈的热效应使其难以兼顾高光束质量输出的需求,不利于功率的扩展。相干合成技术指在多模块结构下通过锁定各单元输出激光的相位实现功率扩展,是得到高亮度相干光束输出的一种有效手段[1-5]。

目前国内外已经提出了多种相干合成方法,从控制手段上可以分为主动锁相和被动锁相两类。主动锁相技术指采用主动调相元件进行实时控制以达到相干合成效果[6-7],2009 年,美国诺格公司推出的 100kW 固体激光器正是采用这一方案[8],该方案涉及复杂的相位探测和调节过程,对系统器件要求较高[9]。被动锁相技术主要通过特殊的结构设计使多个激光振荡腔相互关联,实现锁相输出,主要有相互注入锁定[10-11]、相位共轭锁相[12]、偏振锁相[13]、自成像腔相干合成[14]、干涉仪结构自组织相干合成[15-16,21]等多种方法[18-19]。相互注入锁定激光器结构简单,相干性好,但在腔体调节和耦合控制方面存在困难,因此多用于全光纤结构[20-21]。此前文献[10]采用腔内加入部分反射镜的方式耦合,引入损耗且不利于多路扩展。本文利用偏振元件将两路独立的 Nd:YAG 固体激光器关联起来,解决了耦合过程中的损耗问题,实现了两路激光器的相互注入锁定,获得了总功率 4.4W 的部分相干激光输出,光路结构具有进一步多链路扩展的潜力,对利用相干合成技术实现高能固体激光器技术进行了初步探索和研究。

1 装置及原理

实验光路如图 1 所示,部分反射镜 PR1 与全反镜 HR1 构成子腔 1,PR2 与 HR2 构成子腔 2。每个子腔内加入偏振分光棱镜(PBS)与 $\lambda/4$ 波片

* **收稿日期**:2011-11-01
基金项目:湖南省研究生科研创新资助项目(CX2009B006);国防科技大学研究生科研创新资助项目(B090704)
作者简介:李霄(1983-),男,湖北襄阳人,博士研究生,E-mail:crazy.li@163.com;
许晓军(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:xjxu@21.cn

组对形成可调节的输出耦合器,激光可以同时从 PR 和 PBS 输出,其中从 PBS 输出部分可用于子腔间的耦合,通过旋转 $\lambda/4$ 波片可以对各子腔输出耦合率进行控制,实现高效输出。两子腔的 PBS 相对放置,中间插入 $\lambda/2$ 波片,组成了相互注入的分束器,调节 $\lambda/2$ 波片则可以控制两腔的耦合强度,以实现相位锁定,而从 PBS 透射输出的激光部分可用于进一步扩展光路。本实验采用两路 Nd:YAG 激光进行合成研究,为使激光功率集中,采用高反镜作为 PR 进行实验,主激光由两 PBS 输出。所用模块为吉泰公司 GTPC－75s 型侧泵模块,Nd:YAG 棒直径 3mm,由三组 LD 环绕泵浦,棒周围通水冷却。在两子腔内均加入小孔以保证激光器基模运转,输出光斑经光路转折系统紧密排布后传播 5m 进入 CCD 进行测量。

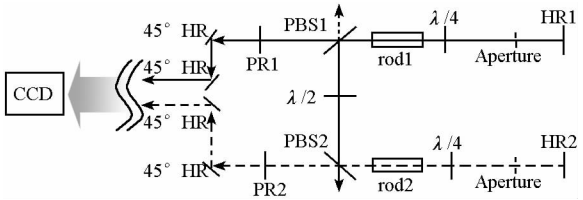


图 1　激光器结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the laser set-up

激光器的模式及频率主要由其腔结构决定,因而两台无关联激光器运转时其输出激光的频率及相位关系完全独立,不具有相干性,而当两谐振腔相互耦合时,可以将整个光路视作统一的谐振腔,当激光频率 ω 同时满足两子腔振荡要求时可以获得最大增益,在模式竞争中处于优势,将两谐振腔关联起来。根据自再现条件,此时激光频率应满足:

$$\begin{cases} \varphi_1 + \nu \dfrac{2\pi L_1}{c} = m\pi \\ \varphi_2 + \nu \dfrac{2\pi L_2}{c} = n\pi \end{cases} \tag{1}$$

式中 φ_1、φ_2 为激光进入各子腔时的初相位,L_1、L_2 为各子腔光程,m、n 为整数,由式(1)可以算得,此时振荡腔内纵模间隔满足:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2(L_1 - L_2)} \tag{2}$$

而无关联时各子腔内纵模间隔分别为$\dfrac{c}{2L_1}$和$\dfrac{c}{2L_2}$。显然,通过相互注入,不仅能够从两谐振腔内选出相位锁定的同频激光,同时还可以增大纵模频率间隔,减少模式数,实验中应尽可能使两子腔长度接近,以改善激光器的相干特性。

2　实验结果分析

实验首先调节 $\lambda/2$ 波片,使两路激光耦合效率最低,测量两路激光的远场光斑叠加效果如图 2(a)所示,两路激光基本没有相干性。调节波片及腔体,在 PR 和 PBS 输出端均可以观测到明显的干涉条纹如图 2(b),此时两路激光锁相运行,但条纹对比度始终无法达到理想状态,将两光斑位置错开可以发现其强度和形态并不严格一致。原因是泵浦模块本身存在差异,且随着功率的提升,差异越来越大。

经过反复调整,激光器最高功率输出约 4.4W 时依然可以保持良好的相干效果。单帧采样远场光斑如图 3(a)所示,其远场中心峰值功率密度约提升至 1.5 倍。图 3(b)所示为 150 帧叠加结果(即 10s 长曝光图),采用图像处理方法得到条纹对比度如图(c)所示,算得远场中心峰值功率密度可以提高至 1.4 倍,获得了明显的相干合成效果。相比单帧采样结果,长曝光条纹对比度略有降低,主要原因是系统内不可避免地存在机械振动,如平台抖动、冷却水冲击等,这些因素都会给系统引入一定的相位噪声,导致长时间上的不稳定。

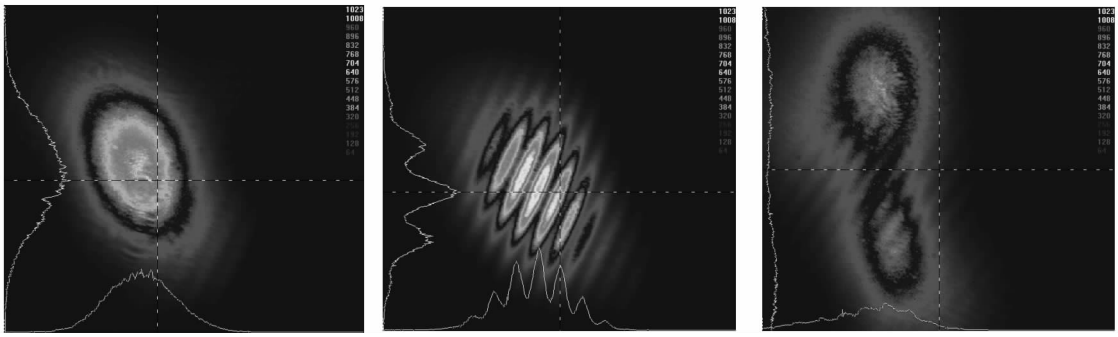
将腔 2 中的 PR2 镜撤掉并调节波片,可以得到一分束输出的迈克尔逊干涉仪结构自组织双模块激光器。在相同测量系统条件下,得到干涉条纹在单帧图像能够有较好锁定效果,而长曝光图则并不理想,如图 4(c)所示。主要原因在于此结构激光器纵模频率间隔取决于两臂长之差[17],在当前设计条件下远大于相互注入锁定结构腔体的频率间隔,因而腔内模式较多,存在较强竞争,相干性较差。反映在实验中则表现为条纹的飘移和突变,如图 4(a)、(b)所示,系统时而锁定于同相模式,时而锁定于异相模式。

3　结　论

本文讨论了相互注入锁定相干合成的机理,采用偏振元件将两路 Nd:YAG 激光器关联起来,获得了明显的相干合成效果,实现了 4.4W 的基模锁相输出,长曝光远场光斑峰值功率密度提高至 1.4 倍。影响合成效果的主要原因是机械振动以及各子模块间的差异。实验采用驻波腔结构,易于调节和进一步实现多链路扩展,但也不可避免地导致了空间烧孔效应,容易引发多模式竞争,影响激光器相干性。而通过精确地设计、调节腔体能够达到一定的选频效果,有效提高激光器相

干性和稳定性。

采用相互注入锁定和自组织腔型结构能够实现明显的相干合成效果,但相互注入锁定技术属于被动锁相,无法克服外界扰动等影响,难以实现完全意义上的相干合成。

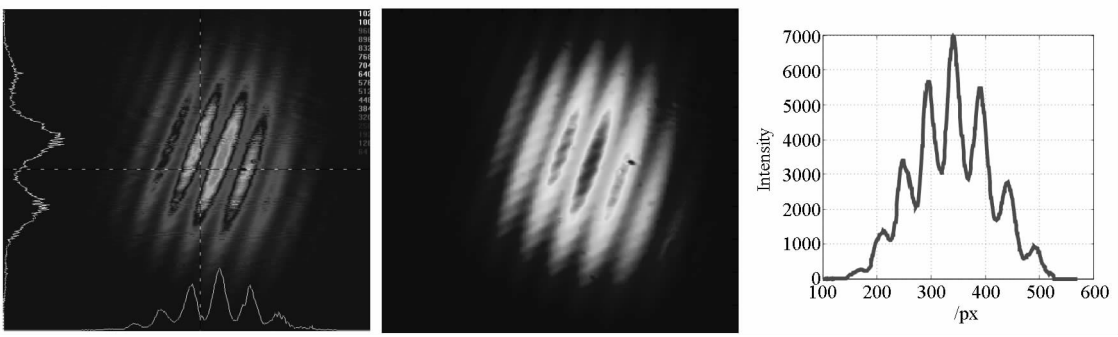


(a) 两激光独立
(a) two independent lasers

(b) 锁相运行
(b) two lasers in phase

(c) 两光斑强度分布
(c) intensity of two lasers

图 2　两路激光远场光斑
Fig. 2　Far-field laser spot

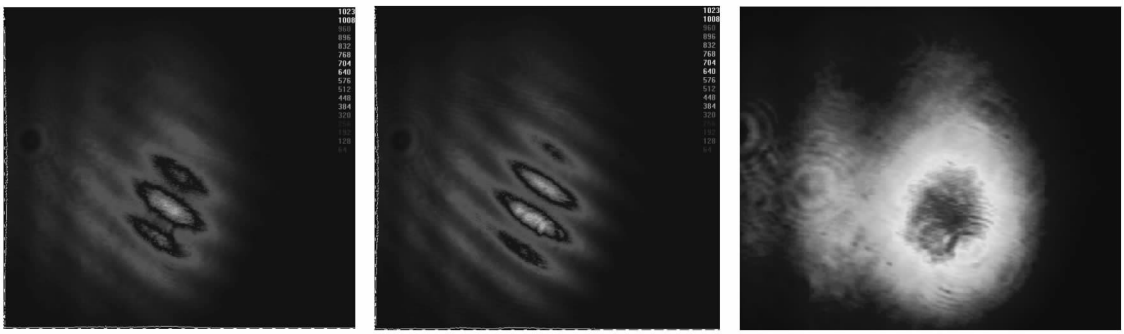


(a) 单帧图片
(a) single picture

(b) 长曝光图(150 帧 10s)
(b) long time observation (10s)

(c) 长曝光条纹对比度
(c) fringe of long time observation

图 3　相互注入锁定激光干涉条纹
Fig. 3　Far-field of two mutual injection-locking lasers



(a) 远场同相锁定
(a) locked with 0 phase shift

(b) 远场异相锁定
(b) locked with π phase shift

(c) 长曝光图(100 帧约 6.7s)
(c) long time observation (6.7s)

图 4　自组织双模块激光器干涉条纹
Fig. 4　Far-field of self-organized two module laser

参考文献(References)

[1] 周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
ZHOU Pu. Study on coherent beam combination technology of fiber lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

[2] 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.
LOU Qihong, HE Bing, ZHOU Jun. Fiber lasers and its coherent beam combination [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 155 – 159. (in Chinese)

[3] 李永忠,范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42 (9): 26 – 29
LI Yongzhong, FAN Dianyuan. Beam combining of fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42 (9): 26

-29. (in Chinese)

[4] 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
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)

[5] 刘泽金,周朴,许晓军. 高能光纤激光系统浅析[J]. 强激光与粒子束,2008, 20: 1795-1801.
LIU Zejin, ZHOU Pu, XU Xiaojun. Analysis of high energy fiber laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008,20:1795-1801. (in Chinese)

[6] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, 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: 231106.

[7] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, et al. Coherent beam combination of three two-one fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Opt. Lett., 2009, 34: 2939-2941.

[8] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at northrop grumman [J]. SPIE, 719507-1.

[9] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. IEEE J. Sel. Top. Topics Quantum Electron, 2009, 15(2): 248-256.

[10] Russel M K, Ranjit D P, Nay T, et al. Mutual injection locking: a new architecture for high-power solid-state laser arrays[J]. IEEE J. Sel. Top. Topics Quantum Electron, 2005, 11(3): 578-586.

[11] 陈子伦. 光纤激光器的相互注入锁定和光子晶体光纤的后处理技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
CHEN Zilun. Studies on mutula injection-locking of fiber lasers and post-processing techniques of photonic crystal fibers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

[12] Kong H J, Lee S K, Lee D W, et al. Phase control of a stimulated brillouin scattering phase conjugate mirror by a self-generated density modulation[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86:1-3.

[13] Phua P B, Lim Y L. Coherent polarization locking with near-perfect combining efficiency[J]. Optics Letters, 2006, 31(14): 2148-2150.

[14] He B, Lou Q H, Zhou J, 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.

[15] 李剑峰,段开椋,王建明,等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. 光学学报, 2008,28(5): 923-926.
LI Jianfeng, DUAN Kailiang, WANG Jianming, et al. Experiment on coherent-locking of two photonics crystal fiber lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2008,28(5): 923-926. (in Chinese)

[16] Dong H C, Li X, Wei C Y, et al. Coaxial combination of coherent laser beams[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(11): 1012-1014.

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

[18] Menard S, Vampouille M, Colombeau B, et al. Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd:YAG laser beams[J]. Optics Letters, 1996, 21(24): 1996-1998.

[19] Peng Q J, Sun Z P, Chen Y H, et al. Efficient improvement of laser beam quality by coherent combining in an improved Michelson cavity[J]. Optics Letters, 2005, 30(12): 1485-1487.

[20] 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.
CHENG Yong, LIU Yang, XU Lixin, et al. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. Chinese J. Lasers, 36(1): 77-81. (in Chinese)

[21] Chen Z L, Hou J, Zhou P, et al. Mutual injection locking and coherent combining of two individual fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008,44(6): 515-519.