

# 角锥互注入锁相光纤激光器相干合成技术研究

程 勇 米朝伟 朱孟真 陆益敏 卢常勇 刘 旭 谭朝勇 韦尚方

(武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075)

**摘要** 提出角锥作为相干合成元件实现互注入锁相获得相干合成输出的方案。对比分析了采用 4 种锁相结构进行两路光纤激光器相干合成的结果,并报道了 4 路光纤激光相干合成的最新实验结果。

**关键词** 光纤光学;相干合成;互注入锁相;角锥

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102005

## Mutual Injection Phase-Locked Combining Technologies of Fiber Lasers Using a Corner-Cube

Cheng Yong Mi Chaowei Zhu Mengzhen Lu Yimin Lu Changyong Liu Xu  
Tan Chaoyong Wei Shangfang

(Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075, China)

**Abstract** Mutual injection phase-locked fiber lasers combining technique based on a corner-cube is proposed and studied. The coherent combination output of two fiber laser beams is obtained by using four different kinds of phase locking structures. These experimental results are analysed contrastively. Furthermore, the latest experimental results of coherent combination of four fiber laser beams are presented.

**Key words** fiber optics; coherent combining; mutual injection phase-locked; corner-cube

**OCIS codes** 060.3510; 140.3290; 140.3298; 140.3520; 140.4050

## 1 引 言

光纤激光器由于具有结构简单、转换效率高、散热效果好、光束质量好和运行成本低等优点,在光纤通信、工业加工、军事武器等众多领域展示出广泛的应用前景,成为当今光电子技术研究领域中最前沿的研究课题之一。虽然目前单根光纤激光器的输出功率得到了极大的提高,达到数千瓦量级<sup>[1,2]</sup>,但由于受到掺杂光纤的非线性效应、光学损伤及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衍射极限。

为实现更高亮度的输出,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的相干合成技术。相干合成一方面可以在保持好的光束质量的同时提高输出功率,另一方面模块化结构分散热效应,克服了热效应造成平均亮度的下降,是实现高功率、高光束质量和高稳定性

激光输出的有效技术途径之一<sup>[2~7]</sup>。

目前,国内外已有主振荡功率放大(MOPA)主动合成方案<sup>[4~6]</sup>、自成像谐振腔相干合成方案<sup>[7,8]</sup>、单模光纤滤波环形腔方案<sup>[9]</sup>、多芯光纤相干合成方案<sup>[10]</sup>等众多的合成方案报道<sup>[11]</sup>。

在固体激光器的实验研究中发现:角锥棱镜谐振腔固体激光器近场能量分布“貌似高阶模”,对应的远场能量分布却呈现中心能量集中分布,主瓣周围通常有旁瓣;当角锥绕光轴旋转时,激光输出性能(能量、脉宽、远场分布等)随之周期性改变;在一些应用中(如激光测距)比使用传统谐振腔激光器的测程明显提高;采用 V 型光阑测试固体激光器相干性发现,角锥腔激光器明显具有比平平腔激光器更高的相干性。因此,文献[12]提出了角锥作为相干合成元件实现互注入锁相获得相干合成输出的思想。

本文简述了角锥互注入锁相实现相干合成的研

收稿日期: 2011-06-10; 收到修改稿日期: 2011-07-30

基金项目: 国防预研项目(51302010206)资助课题。

作者简介: 程 勇(1961—),男,博士,教授,主要从事全固态激光器及相干合成等方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net

究方案,开展了外腔式、内腔式和分束镜输出、偏振耦合输出组合的 4 种结构相干合成实验,获得了两路可见度高达 0.92、功率合成效率约 90% 的稳定线偏振相干合成激光输出。4 路光纤激光器互注入锁相获得了合成功率大于 32 W、功率合成效率 80% 的典型二维阵列相干合成输出。

## 2 角锥互注入锁相相干合成方案及实验装置

互注入锁相<sup>[13]</sup>是指  $N$  个子激光器之间通过能量相互注入实现锁相输出,若子激光器之间的频率差处于锁相带宽内,则各个子激光器之间由于能量的相互注入,激光模式之间互相影响、互相牵制进而自组织实现同频率、相位差恒定输出。文献[10,14,15]分析了能量互注入型激光阵列的相干合成原理

和特点。

利用角锥棱镜的后向反射效应和退偏效应,可以实现激光器之间的能量互注入,文献[16]给出了锁相带宽范围,开展了外腔式分束镜锁相 a 方案[图 1(a)]、内腔式分束镜锁相 b 方案[图 1(b)]和关联光纤激光器外腔式偏振耦合锁相 c 方案[图 1(c)]、内腔式偏振耦合锁相 d 方案[图 1(d)]4 种锁相结构的相干合成实验。

实验中,两路光纤激光器所采用的抽运源、掺杂光纤和光纤光栅等元件的参数几乎完全相同,可认为两路光纤激光器的抽运系数、增益系数、衰减系数和光强振幅基本相等。其中,a,b 方案采用香港 Amonics 公司生产的 AYDLS-1085-10-R-CL 型光纤激光器;c,d 方案采用课题组自主研发的两路关联光纤激光器。

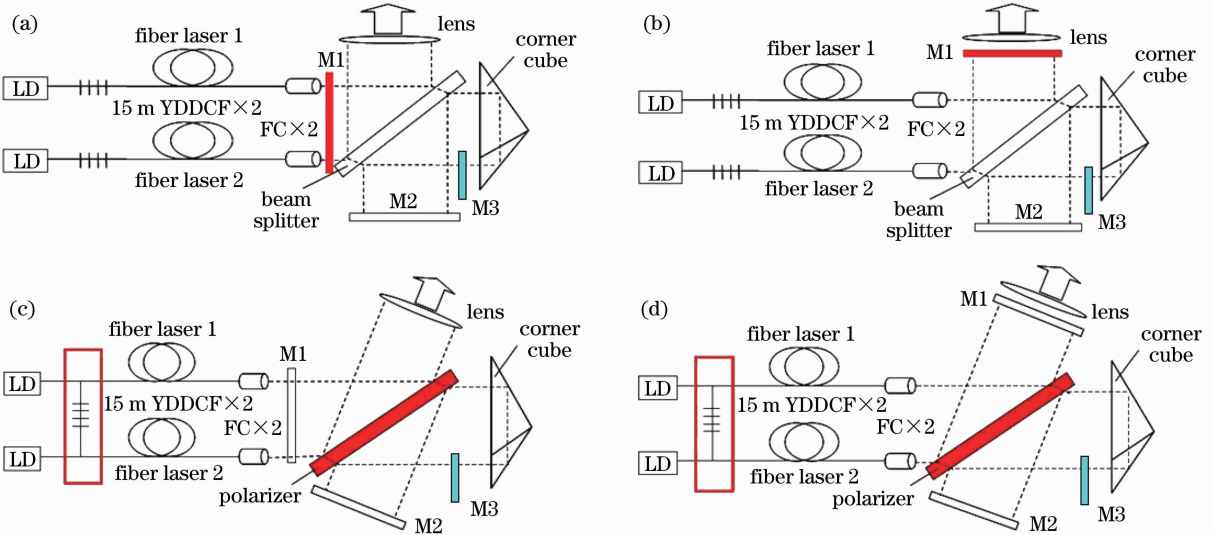


图 1 两路光纤激光器互注入锁相相干合成实验结构图。(a)外腔式分束镜输出;(b)内腔式分束镜输出;(c)外腔式偏振耦合输出;(d)内腔式偏振耦合输出

Fig. 1 Experimental setup of mutual injection phase-locking of two fiber lasers. (a) Extra-cavity with splitter; (b) in-cavity with splitter; (c) extra-cavity with polarizer; (d) in-cavity with polarizer

两台带尾纤输出的半导体激光器(LD)(发射波长为 975 nm)作为抽运源,Yb<sup>3+</sup>掺杂双包层光纤激光器的结构完全相同,增益光纤为 15 m 长的 Yb<sup>3+</sup>掺杂双包层光纤(7/130,数值孔径 0.41),尾端连接一个小尺寸组合透镜式准直器(FC)。a,b 方案中光纤布拉格光栅(FBG)(反射率  $R > 99\%$  @1085 nm)作为两路光纤激光器的前腔镜。在 c,d 方案中采用两边对称的 FBG( $R > 85\%$  @1085 nm)作为两路光纤激光器的共用前腔镜,当两路光纤激光器工作时,分别有大约 15% 的能量通过光栅注入到另一路中,使其有一定的内部相互关联。

与角锥底面顶点对称排列,角锥与准直器之间插入一块 45°半透半反分束镜,分束镜以 45°角度放置。文献[16,17]分别阐述了方案的能量互注入过程。M1 是一块对 1085 nm 波段反射率为 0.15 的平面镜,作为输出腔镜,使两路光纤激光器实现稳定的激光振荡输出。输出镜 M1 在分束镜之前称为外腔式<sup>[16]</sup>,在分束镜之后称为内腔式<sup>[17]</sup>。采用一块对信号光全反的平面镜 M2 使被分束镜反射出腔外的激光沿原路返回,重新回到激光振荡区域。

c,d 方案<sup>[18,19]</sup>中,以布儒斯特角放置的偏振片代替 45°半透半反分束镜,M1 是一块对信号光反射率为 0.2 的平面镜,形成线偏振输出。

a,b 方案中,两路光纤激光器的准直器输出端

### 3 角锥互注入锁相相干合成实验

相干合成是要在保持好的光束质量的同时获得高的激光输出功率,关键在于条纹可见度、合束效率、占空比以及可扩展性。对于被动锁相方案,合成前后的光谱的变化可以精细地反映锁相效果,故主要从条纹可见度、合束效率以及光谱变化这三方面进行了考察。利用 Spiricon 公司生产的 LBA-FW-SCOR20 型激光光斑分析仪 (CCD, 软件版本 4.83) 测量光纤激光器互注入前后的远场光强分布。相干合成激光阵列的功率合成效率 ( $\eta$ ) 定义为:在相同抽运条件下,激光阵列相干合成后的总体输出功率 ( $P_{\text{combined}}$ ) 与激光阵列在未引入相干合成元件前的近场总体输出功率 ( $P_{\text{uncombined}}$ ) 的比值,即  $\eta = P_{\text{uncombined}} / P_{\text{combined}}$ 。采用 YOKDGAWA 公司的 AQ6370 型光纤光谱仪来测量锁相前后激光光谱及其变化。实验中观察到了波长锁定现象、线宽压缩现象,发现了波长漂移量与光束功率比值关系,获得了高的条纹对

比度和功率合成效率<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 两路光纤激光器相干合成

图 2 是 a, b 方案中两台光纤激光器独立运行时远场光强分布情况,均为高斯分布。图 3(a) 是 a 方案中插入 M3 挡住角锥棱镜后两台光纤激光器在远场的合成光强分布图,由图可知,此时是两路光纤激光器的非相干合成,为光强叠加。图 3(b) 是 c, d 方案中未引入角锥锁相系统时两路关联运行光纤激光器在远场的合成光强分布图,由于内部已有 15% 的能量互注入,两路光纤激光器的远场合成光斑有微弱的相干图样,此时两路激光之间有一定的相干性。

图 4(a)~(d) 分别是 a, b, c, d 方案中通过角锥互注入之后的合成远场光强分布图,实验中看到了稳定的远场干涉条纹,可以判定实现了能量互注入锁定。由图可见远场相干条纹非常清晰,可见度依次提高,分别为 0.70, 0.75, 0.81 和 0.92, 显然内腔式结构较外腔式结构远场光斑对比度要好。

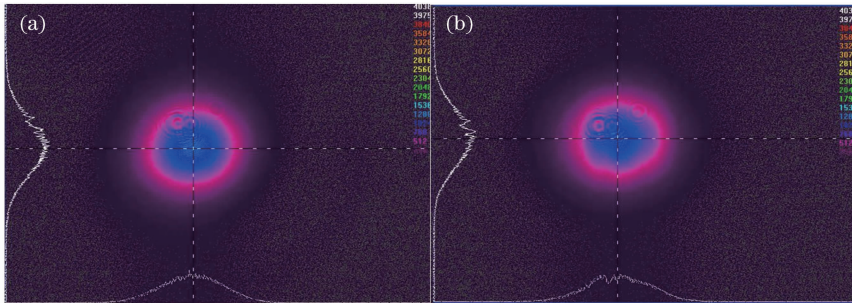


图 2 a/b 方案中两台光纤激光器独立运行时的远场光强分布图。(a) 光纤激光器 1; (b) 光纤激光器 2

Fig. 2 Far field pattern of two individual fiber lasers of scheme a/b. (a) Fiber laser 1; (b) fiber laser 2

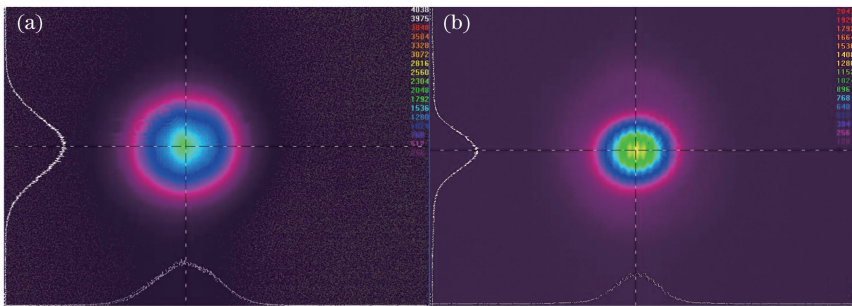


图 3 两路光纤激光器远场叠加的光强分布图。(a) a 方案; (b) c/d 方案

Fig. 3 Far field pattern of two fiber lasers in free running. (a) Stripes of scheme a; (b) stripes of scheme c/d

a, b 方案中两路独立光纤激光器在未加入角锥锁相系统前的最高输出功率分别为 6.9 和 7.1 W, 合成后最高输出功率  $P_{\text{Combined}}$  分别为 10 和 11 W, 通过多组实验得到在电流逐渐增大过程中两路光纤激光器的平均合成效率约为 70% 和 80%。

c, d 方案中在加入角锥锁相系统之前,在最高抽运电流时,原始最高输出功率 9.4 W<sup>[19]</sup>。按照 c,

d 方案通过角锥互注入锁相之后,最大输出功率分别达到 7.7 和 8.6 W, 在电流逐渐增大的稳定输出过程中,功率合成效率分别稳定在约 80% 和 90%。

图 5 为 4 种方案实验结果的比较。从 4 种方案的条纹可见度及功率合成效率的对比上可以看出:无论采用分光镜还是偏振片,内腔式结构明显好于外腔式结构;内部关联光纤激光器结构好于独立光

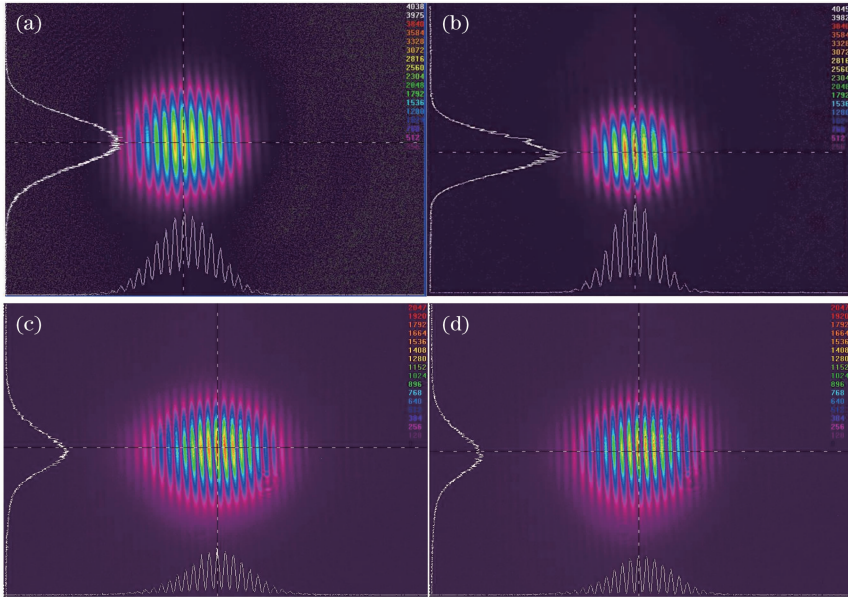


图 4 4 种结构方案对应的光纤激光器相干合成远场光强分布图。(a) a 方案;(b) b 方案;(c) c 方案;(d) d 方案  
 Fig. 4 Far field pattern of the two fiber lasers in mutual injection locking condition. (a) Stripes of scheme a; (b) stripes of scheme b; (c) stripes of scheme c; (d) stripes of scheme d

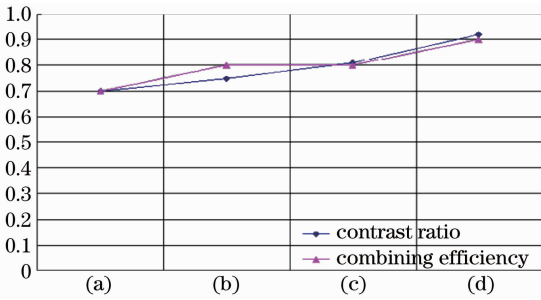


图 5 4 种方案条纹对比度和合成效率对比图  
 Fig. 5 Contrast ratio and combining efficiency of the four schemes

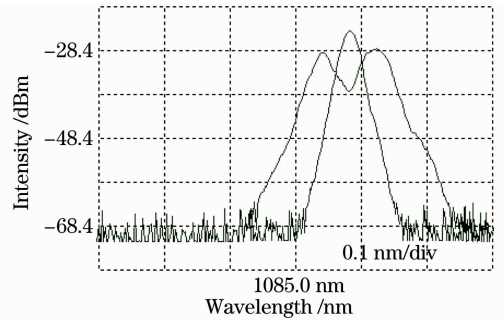


图 6 合成前后输出光谱图

Fig. 6 Spectra of uncombined and combined condition

纤激光器结构。从实验操作上,外腔式结构调试较为简单,内腔式结构则较为复杂。

图 6 为 c 方案下锁相前后的光谱变化。两路光纤激光光谱差别很小,互注入之后以共同频率输出。对比文献[12,17]光谱,可以看出内部关联光纤激光器光谱重叠性更好,锁相之后线宽更窄,故锁相效果更好。

基于以上实验结果和分析,可以得出:采用内部关联激光器方案可以解决不对称位置多路激光能量互注入问题,采用内腔式结构可以很好地提高多路激光的合成效率。这为采用角锥互注入实现多路光纤激光阵列相干合成获得更高功率和亮度的激光输出提供了实验基础。

### 3.2 4 路光纤激光器相干合成

在两路角锥互注入锁相相干合成基础上,开展了多路光纤激光相干合成,文献[19]给出了一种角锥多路光纤激光相干合成方案。角锥 4 路光纤激光器相干合成实验结构分别如图 7,8 所示。前期结合现有实验条件开展了图 7 所示方案的实验,4 路光纤激光器呈二维正方形结构排列,两路关联光纤激光器在下方,两路独立光纤激光器在上方。独立光纤激光器分别通过角锥与关联光纤激光器互注入,如图 7(b)所示,关联光纤激光器通过互注入光栅实现互注入,从而实现 4 路光纤激光器的互注入。采用合成效率较高的内腔式偏振耦合输出结构,得到了典型二维激光远场相干光斑分布[如图 9(a)所示]。由于互注入能量对整个系统的影响不对称,无论是远场的可见度还是中心光斑的亮度都不理想,锁相效果较差。

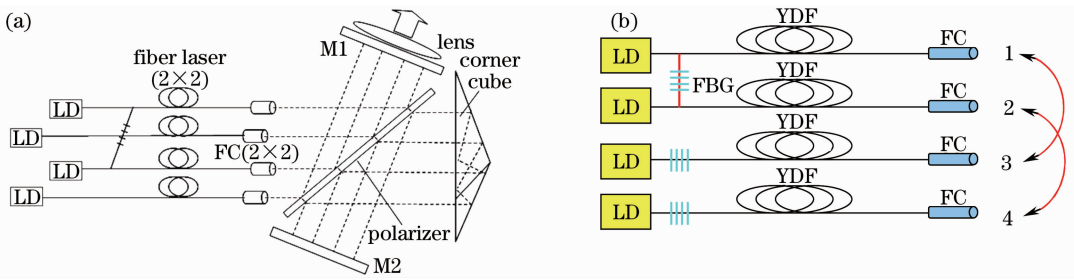


图 7 4 路光纤激光器相干合成实验结构。(a)系统结构;(b)示意图

Fig. 7 Mutual injection phase-locking of four fiber lasers. (a) System setup; (b) schematic diagram

基于此,改进了方案,重新设计了两组关联光纤激光器[图 8(a)],两组关联光纤激光器通过角锥分别交叉互注入,如图 8(b)所示,关联光纤激光器之间通过尾部互注入光栅实现互注入,进而实现二维 4 路光纤激光器的完全对称互注入。经过精细调节

获得了较好的合成远场分布,如图 9(b)所示,由图可知,该分布为典型的二维阵列远场分布,且对比度较好,说明互注入锁相效果较好。总的合成输出功率大于 32 W,如图 10 所示,在注入电流逐渐增大的过程中,合成效率稳定在 80%以上。

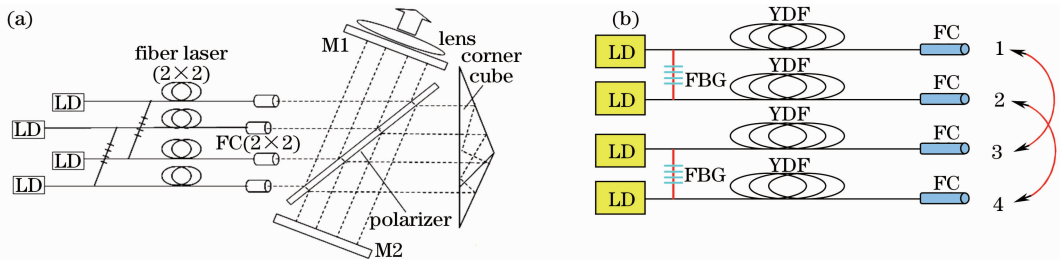


图 8 改进的 4 路光纤激光器相干合成实验结构。(a)系统结构;(b)示意图

Fig. 8 Advanced mutual injection phase-locking of four fiber lasers. (a) System setup; (b) schematic diagram

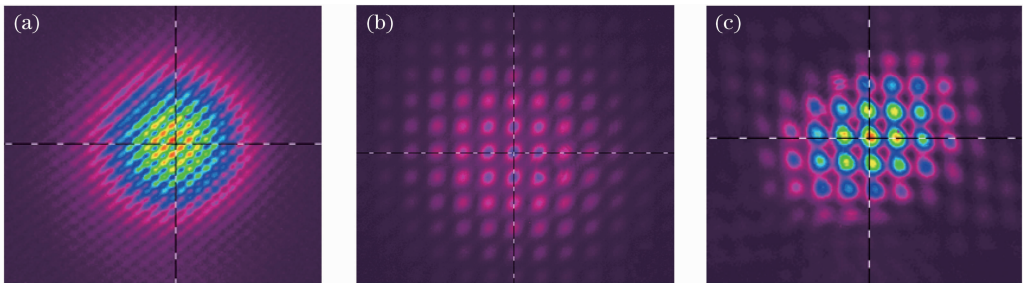


图 9 4 路光纤激光器相干合成远场光斑分布

Fig. 9 Far field pattern of four fiber lasers mutual injection phase-locked

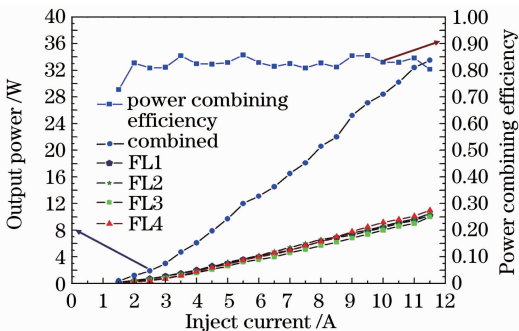


图 10 4 路光纤激光器相干合成功率合成曲线

Fig. 10 Output power comparison between coherent combined and individual power

占空比是影响相干合成阵列远场光斑能量集中度的主要因素,提高占空比可以提高远场光斑中心主瓣所占的能量比值,提高相干合成效果。采用图 11 所示的  $45^\circ$  棱锥来改变占空比,激光以  $45^\circ$  射向棱锥表面,经过反射后平行射出,通过沿轴线移动棱锥可以改变平行光束之间的距离,进而改变占空比。

通过初步压缩占空比,获得了如图 9(c)所示的相干合成分布,对比度进一步提高,主瓣能量更加集中,相干合成效果更好。该方案在实现多路光纤激光器相干合成上有很强的扩展性和延伸性,可以实现

现  $N = \sum_{i=1}^n 6i$  路角锥互注入锁相光纤激光器相干合

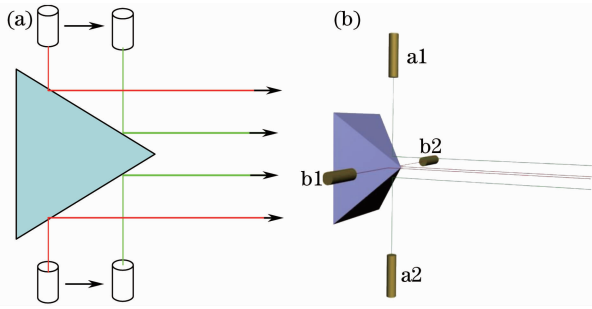


图 11 棱镜改变占空比示意图。(a) 2 路;(b) 4 路  
Fig. 11 Schematic diagram of prism adjusting duty ratios. (a) Two laser; (b) four laser

成。同时,角锥互注入锁相方案同样适用于多路脉冲光纤激光器的相干合成和其他波段光纤激光器的相干合成。

## 4 结 论

光纤激光器相干合成技术可以在提高激光器输出功率的同时保持良好的光束质量,是国内外光电领域研究的热点。本文简述了角锥互注入锁相结构实现两路光纤激光器相干合成输出的实验结果,对比了 4 种不同锁相结构的相干合成效果。采用关联光纤激光器内腔式锁相方案获得了可见度高达 0.92、功率合成效率约 90% 的两路激光稳定线偏振相干合成输出。报道了最新的角锥互注入 4 路光纤激光器相干合成的进展,获得了典型的二维阵列激光相干合成的分布图样,通过改变占空比使主瓣能量更加集中。从实验结果上看,角锥互注入锁相光纤激光器相干合成技术具有相干度高、合束效率高等特点,可实现多路激光相干合成,且结构简单,对激光器要求较低<sup>[16,19]</sup>,非常适合能量型应用,是激光相干合成领域一种有前途的技术途径,具有重要的研究价值和应用前景。

### 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 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun *et al.* Analysis of high energy fiber laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1795~1801  
刘泽金,周朴,许晓军等.高能光纤激光系统浅析[J].*强激光与粒子束*, 2008, **20**(11): 1795~1801
- 3 Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 26~29  
李永忠,范滇元.光纤激光器光束的叠加技术[J].*激光与光电学进展*, 2005, **42**(9): 26~29
- 4 Liu Zejin, Hou Jing, Xu Xiaojun *et al.* Research 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
- 5 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent

- combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 276~280
- 周朴,刘泽金,许晓军.光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J].*中国激光*, 2009, **36**(2): 276~280
- 6 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
- 7 J. Li, K. Duan, Y. Wang *et al.* High-power coherent beam combining of two photonic crystal fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(11): 888~890
- 8 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
- 9 Jerome Lhermite, Agnes Desfarges-Berthelebot, Vincent 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
- 10 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
- 11 Liu Yang, Cheng Yong, Wang Xiaobing *et al.* Recent progress of fiber laser combining technology [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2007, **24**(3): 283~288  
刘洋,程勇,王小兵等.光纤激光合成技术研究新进展[J].*量子电子学报*, 2007, **24**(3): 283~288
- 12 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.* Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. *Chinese J. Laser*, 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
- 13 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  
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
- 14 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
- 15 Chen Zilun, Hou Jing, Zhou Pu *et al.* Mutual injection-locking and coherent combining 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
- 16 Liu Yang, Cheng Yong, Xu Lixin *et al.* Mutual injection phase-locking of two double clad fiber lasers [J]. *Acta Physica 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 Liu Yang, Cheng Yong, Xu Lixin *et al.* Extra-cavity mutual injection phase-locking of two fiber lasers [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2009, **20**(7): 890~892  
刘洋,程勇,许立新等.两路光纤激光器外腔式互注入锁相实验研究[J].*光电子·激光*, 2009, **20**(7): 890~892
- 18 Mi Chaowei, Liu Yang, Zhu Mengzhen *et al.* Mutual injection phase-locking of two inter-related fiber lasers [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, **8**(6): 84~87  
米朝伟,刘洋,朱孟真等.两路关联光纤激光器互注入锁相实验[J].*光学与光电技术*, 2010, **8**(6): 84~87
- 19 Zhu Mengzhen, Huang Changchun, Cheng Yong *et al.* Mutual injection phase-locked study of fiber laser with two out ports [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 2964~2968  
朱孟真,黄长春,程勇等.双端输出光纤激光器互注入锁相研究[J].*中国激光*, 2010, **37**(12): 2964~2968