

文章编号 1004-924X(2009)08-1845-06

# 迈氏腔光纤激光器的相干合成

王会升, 刘 洋, 韦尚方, 丁方正, 米朝伟, 程 勇  
(武汉军械士官学校 光电研究所, 湖北 武汉 430075)

**摘要:**为获得高功率和高亮度光纤激光输出,设计了利用一块  $45^\circ$  半透半反分束镜作为干涉元件,构建迈氏腔结构,使两路光纤激光器在输出端相干相长,从而实现相干合成输出的方案。从理论上分析了此方案的锁相机理,并在实验中成功实现了两路光纤激光器的相位锁定,使合成输出激光在自由空间传播,获得了功率约为 360 mW 的相干合成激光输出,功率合成效率约为 73%,合成输出后的激光束在轴上光强获得了大幅度提高。本方案结构简单,利用了光纤耦合器干涉锁相的原理,但却避免了光纤耦合器承受功率低的缺点,所有元件均可承受高功率,因此可实现更高功率的相干合成激光输出,是一种有前途的高功率光纤激光器相干合成方案。

**关键词:** 光纤激光器; 迈克尔逊腔; 相干合成; 分束镜

**中图分类号:** TN248.8 **文献标识码:** A

## Coherent combination of Michelson cavity fiber lasers

WANG Hui-sheng, LIU Yang, WEI Shang-fang, DING Fang-zheng, MI Chao-wei, CHENG Yong

(*Optoelectronics Facility, Wuhan Ordnance Non-commissioned Officer Academy, Wuhan 430075, China*)

**Abstract:** A phase-locking method for two individual fiber lasers is proposed to realize high power and high brightness fiber laser outputs. By taking a beam splitter with reflectivity of 50% at  $45^\circ$  as an interferometric element to construct the Michelson cavity, two optical fiber lasers can realize coherent enhancement at output ends, so that the coherent combination output of two laser beams is complemented. The phase-locking principle is analyzed in detail and the phase-locking of two individual double clad fiber lasers is experimentally demonstrated. Experiments obtain a coherent combination laser output of 360 mW, and a power combination efficiency about 73%. Moreover, the on-axis power intensity is greatly enhanced. The phase-locking approach is simple and no power-limitation optical components, so the drawbacks of fiber couplers are eliminated and the output power can be further up scaled. These results show the method is one of the most promising phase-locking technologies in the high-power fiber laser coherent combination field.

**Key words:** fiber laser; Michelson cavity; coherent combining; beam splitter

## 1 引 言

光纤激光器相干合成技术是目前高功率激光

研究领域的一个热点,是获得高功率和高亮度激光输出的一种有前途的技术途径。从目前已经报道的文献来看,光纤激光相干合成技术按相位锁定的方式分有主动锁相和被动锁相两种。主动相

收稿日期:2008-10-29;修订日期:2008-11-13.

基金项目:军用光电技术国防预研项目(No. 51302010206)

位锁定是通过对各光束的相位进行实时监控,并通过快速的相位补偿方法实现对各光束的相位实时控制,使各光束工作在恒定的相位差条件下。采用主动相位锁定方式,美国 Northrop Grumman 航空技术研究所已经实现了 4 路光纤激光器的相干合成,输出功率超过了  $470\text{ W}^{[1]}$ ,并实现了输出功率高达  $19\text{ kW}$  的两路板条激光器相干合成输出<sup>[2]</sup>,该技术被认为是短期内实现  $100\text{ kW}$  级功率输出的首选方案。然而,主动锁相方案需要对每个子激光器进行相位探测和补偿,使其结构过于精密和复杂,系统特别庞大。被动相位锁定则是多个激光器通过某种方式组成一个自适应系统,当系统稳定工作时,各个激光器的波长和相位被自动锁定,从而获得稳定的相干合成激光输出。目前国内外已有多种被动相位锁定相干合成方案的报道,如自成像谐振腔方案<sup>[3-4]</sup>、多芯光纤相干合成方案<sup>[5]</sup>和耦合器干涉锁相方案<sup>[6-8]</sup>等,并且更多的被动锁相相干合成方案和最新的实验结果也在逐渐被报导。

从目前所报导的光纤激光器相干合成方案来看,耦合器干涉锁相方案结构最为简单。然而光纤耦合器并非大功率器件,不能承受高功率,而且耦合器方案是将多根光纤的输出激光通过干涉原理耦合进一根光纤,其输出功率最终还是受限于单根光纤的功率承受能力,未能突破单根光纤的功率限制,制约了该方案的发展前途。采用类似光纤耦合器干涉锁相的合成原理,利用体元件替代光纤耦合器,并使合成输出激光在自由空间传播,就可克服上述耦合器干涉锁相方案的缺点。国外在固体激光器相干合成实验中已经采用此类方法<sup>[9-10]</sup>,国内西安光机所也在光子晶体光纤激光器的相干合成实验方案中采用了此种方法<sup>[11]</sup>,但其功率合成效率仅为  $65\%$ 。本文利用一块  $45^\circ$  半透半反分束镜作为干涉元件,构建了迈氏腔相干合成结构,成功实现了两路光纤激光器的相位锁定,使两路光纤激光器在输出端相干相长,获得了功率为  $360\text{ mW}$  的相干合成激光输出,功率合成效率约为  $73\%$ 。此装置利用了光纤耦合器干涉锁相的相同原理,避免了光纤耦合器承受功率低的缺点,可实现更高功率的相干合成激光输出。

## 2 实验方案及原理

基于一块  $45^\circ$  半透半反分束镜作为干涉元

件,实现两路光纤激光器相干合成输出的实验方案如图 1 所示。两路 Yb 掺杂双包层光纤激光器的结构完全相同,两台带尾纤输出的半导体激光器 LD(发射波长为  $975\text{ nm}$ )作为抽运源,两只反射波长几乎全同的光纤 Bragg 光栅(FBG,  $R > 0.99 @ 1\ 085\text{ nm}$ )作为激光器的前腔镜,增益光纤为  $15\text{ m}$  长的 Yb 掺杂双包层光纤(芯径  $7\ \mu\text{m}$ , 外包层为星型,包层直径  $130\ \mu\text{m}$ , 数值孔径  $0.41$ ),增益光纤的尾端连接一个光纤准直器(FC)。由于准直器表面做了增透镀膜处理,对信号光几乎无反射,因此不能与 FBG 形成稳定谐振。从两个 FC 准直输出的两路光垂直入射到  $45^\circ$  半透半反分束镜,并在分束镜的两个表面发生干涉叠加。当两路光纤激光器的相位满足一定条件时,即可在一个输出方向干涉相长,另一个输出方向干涉相消。方案图中的 M 是一块对  $1\ 085\text{ nm}$  波段反射率为  $0.15$  的平面镜,作为两路光纤激光器的输出腔镜,同时与两台光纤激光器的 Bragg 光栅构成激光谐振腔。

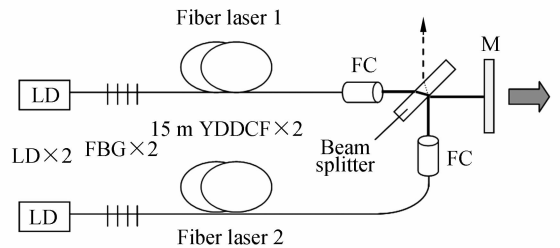


图 1 两路光纤激光器相干合成实验结构图  
Fig. 1 Scheme diagram of experimental setup for phase-locking of two fiber lasers

本实验方案实现两路光纤激光器的相位锁定合成输出是基于两路激光的干涉原理自组织形成的。两路光在  $45^\circ$  半透半反分束镜表面发生干涉叠加,如果两路光在到达分束镜表面时相位差满足某种条件,则可以在两个相互垂直的输出方向分别发生相长和相消干涉。如果此时在干涉相长输出段加以反馈形成谐振腔,由于干涉相长信号光在腔内的损耗最小,因此最容易达到激光的稳态输出条件,最终将使两台激光器都分别以其输出相位满足恒定相位差,即满足干涉相长条件的相位差振荡输出,实现两路光纤激光器的相位锁定,从而获得相干合成激光输出。

迈氏腔干涉锁相的具体物理机理可详细解释

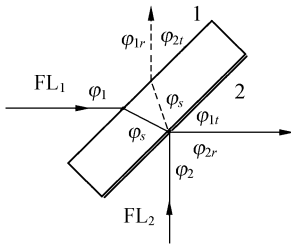


图 2 两路光纤激光器在分束镜上的相位分布图  
Fig. 2 Phase distribution of two fiber lasers at beam splitter

如下:如图 2 所示,分束镜的上表面 1 镀有对 1 085 nm 波段信号光的增透膜,下表面 2 镀有对信号光的半透半反膜。设两路光纤激光分别到达分束镜表面时的初始相位为  $\varphi_{10}$  和  $\varphi_{20}$ ,第一路光纤激光从分束镜上表面 1 传播到下表面 2 的过程中由于光程原因引起的相位变化为  $\varphi_s$ ,由于下表面 2 存在对激光信号半透半反的介质膜,第一路激光在下表面将发生半反射和半透射。对于透射输出光,由于是从光密介质进入光疏介质,引入半波损,因此从下表面输出时其相位可表示为  $\varphi_{1t} = \varphi_{10} + \varphi_s + \pi$ ;对于反射输出光,光在下表面反射回分束镜,将再次引入一次光程相位差  $\varphi_s$ ,在上表面 1 输出时再次引入相位的半波损耗,因此其在上表面 1 输出时的相位为  $\varphi_{1r} = \varphi_{10} + 2\varphi_s + \pi$ 。对于第二路光纤激光,将直接在下表面发生半反射和半透射,对于反射输出光,其相位保持不变,  $\varphi_{2r} = \varphi_{20}$ ,对于透射光,在上表面输出时,其相位为  $\varphi_{2t} = \varphi_{20} + \varphi_s + \pi$ 。

由于两路光纤激光器的结构相同,因此可假设其自由振荡频率和输出强度都完全相同,  $FL_1$  的反射光将与  $FL_2$  的透射光在上表面发生干涉叠加,其相位差可表示为

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_{1r} - \varphi_{2t} = \varphi_{10} - \varphi_{20} + \varphi_s, \quad (1)$$

$FL_1$  的透射光将与  $FL_2$  的反射光将在下表面发生干涉叠加,其相位差可表示为

$$\Delta\varphi_2 = \varphi_{1t} - \varphi_{2r} = \varphi_{10} - \varphi_{20} + \varphi_s + \pi, \quad (2)$$

从式(1)和(2)可知,  $\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = \pi$ ,即当两路光纤激光满足在一个输出方向相干相长叠加时,在另外一个输出方向就必然发生干涉相消。对于本方案,如果两路光纤激光器的相位差满足  $\varphi_{10} - \varphi_{20} = (2n+1)\pi - \varphi_s$  时,即可实现在下表面 2 发生干涉相长。实验中在干涉相长输出端引入了一块

谐振腔镜 M,促使两路激光器自由振荡模式中满足干涉相长相位条件的模式具有最低的腔损耗,获得优先振荡,抑制其他相位模式的振荡放大输出,就可获得稳定的相位锁定相干合成激光输出。

### 3 实验结果及分析

对于激光器相干合成阵列来说,两项指标是最重要的,一是激光阵列的功率合成效率,对于两路激光相干合成来说,如果激光束的功率合成效率低于 50%,那么合成输出后的功率将小于合成前的单路激光器的输出功率,因此将没有任何意义,功率合成效率越高,激光相干合成阵列的效费比越好;二是激光阵列的远场光强分布(或亮度),远场光强分布(或亮度)体现出激光阵列的相干程度。基于以上认识,在实验中重点研究了本方案的功率合成效率和远场光强分布。

#### 3.1 功率合成效率

功率合成效率是衡量激光相干阵列的一个重要指标,为科学地定义和测量本实验中的两路光纤激光器的功率合成效率,本实验中相干合成激光阵列的功率合成效率定义为:在相同抽运条件下,两路光纤激光器在相干相长端合成输出的功率与两路光纤激光器原始输出功率之和的比值。功率合成效率测试实验研究步骤如下:首先在搭建相干合成实验光路前,在每路光纤激光器的准直器外加上输出镜 M,作为光纤激光器的输出腔镜,如图 3 所示。精密调节光路,使 FBG 和 M 构成光纤激光器的谐振腔,从而实现两路光纤激光器的稳定输出,当输出功率达到最高时,即可认为激光器达到了最佳的谐振状态。此时分别测试两路光纤激光器的输出功率随抽运电流的变化曲线,两路光纤激光器的输出功率之和即为相干合成前阵列的原始输出功率。

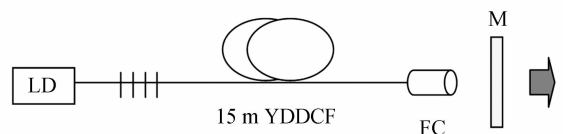


图 3 单个光纤激光器结构图  
Fig. 3 Structure scheme of single fiber laser

然后,在相干合成后,分别测试激光阵列的相干相长输出端和相干相消输出端的输出功率随抽运电流的变化曲线。测试的相干合成激光器相干相长输出端、相干相消输出端和独立振荡输出光纤激光器的输出功率随抽运电流的变化曲线如图 4 所示。

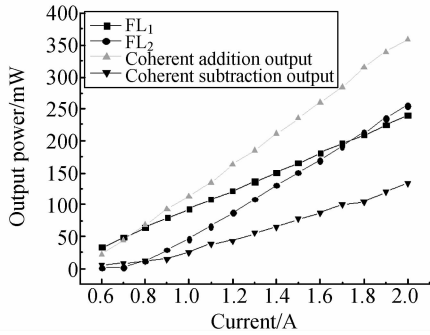


图 4 激光输出功率随抽运电流变化的特性曲线

Fig. 4 Characteristic curves of output powers changed with pumped currents

由图 4 可以知道,两台独立振荡输出光纤激光器的  $P-I$  曲线差别较大,这是由于实验中两台光纤激光器的抽运源的特性不同所造成的。由光的干涉原理可知只有当两路激光的输出功率完全相等时,在相干相消端的输出功率才有可能完全相消。在本实验中,当两台光纤激光器的抽运源的抽运电流均为 1.8 A 时,两路光纤激光器的输出功率接近相同,此时两路激光器具有最好的相干合成条件,测试出两路光纤激光器的合成效率约为 73%,远远高于 50%。然而实验中也发现,在相干相消端一直有部分激光输出,这是因为两路光纤激光器的输出功率不对称、干涉光路不完全重合、位相噪声和光束偏振不完全相同等因素引起的。如何消除这些影响,提高激光器的功率合成效率有待做更深入的研究。

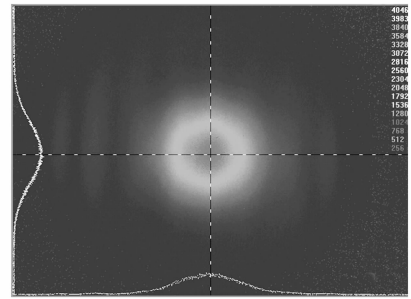
### 3.2 远场光强(或亮度)分布

通常,两路光纤激光器的相干合成实验是通过观察两路激光器的远场干涉条纹来判断激光阵列的相干合成特性的,然而在本实验中,由于两路光最终耦合到了一个通道输出,因此不能用传统的办法来衡量。由光的干涉理论可知,当两路强度相同的光在空间相遇,如果是相干相长叠加,则叠加后的光轴强度(即轴上亮度)将是各路光在光轴上原始强度的 4 倍,如果是非相干叠加,则叠加

后的光轴强度是各路光在光轴上原始强度的 2 倍。基于这一特性,实验中用两种方法验证了本方案中输出的激光为相干合成输出光。

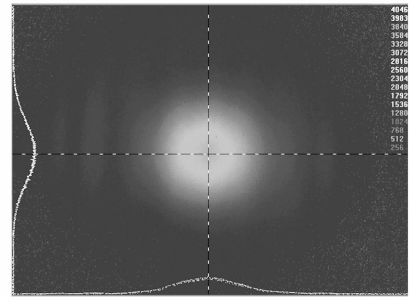
#### 3.2.1 光斑分析法

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) 测量两路光纤激光器合成前后的远场光强分布。两台光纤激光器的抽运电流均设置为 1.8 A,



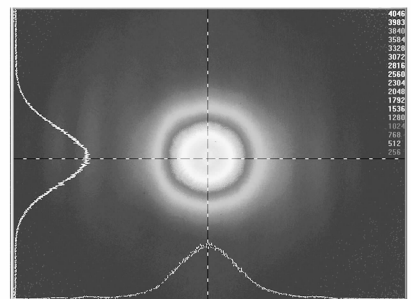
(a) 独立运行

(a) Free running



(b) 独立运行

(b) Free running



(c) 相干合成输出

(c) Coherent addition output

图 5 两路光纤激光器合成远场光强分布图

Fig. 5 Far field pattern combined with two fiber lasers

分别测量两台激光器单独工作时在输出端的光斑,如图 5(a)和 5(b)所示;两路同时工作时测量的合成光斑如图 5(c)所示。从图中可以清晰看出,两路光纤激光器在合成后,其轴上光场得到了大幅度的提高,远高于两台独立振荡输出光斑强度之和,因此证明了本方案是两路光纤激光器的相干合成输出。

### 3.2.2 光谱分析法

利用 Ando 公司生产的 AQ6370 型光栅光谱仪测量两路光纤激光器合成前后的光谱变化,也可间接得出两路光纤激光器合成前后的轴上光强变化。与 3.2.1 一样,两台光纤激光器的抽运电流设置为 1.8 A,分别测量两台激光器单独工作时在输出端的光谱和两路同时工作时合成输出光谱,如图 6 所示。图中的纵坐标反映了光谱仪所接收到的光强的变化,两路光纤激光合成输出,其轴上光强提高了约 6 dBm(即约 4 倍),因此也证明了本方案是两路光纤激光器的相干合成输出。

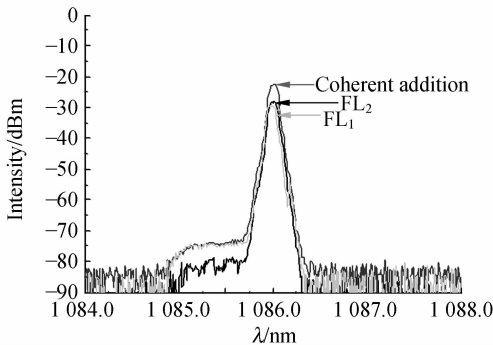


图 6 两路光纤激光器独立振荡时和合成后的输出光谱图

Fig. 6 Spectra of two free running fiber lasers ( $FL_1$ ,  $FL_2$ ) and the combined lasers

需要指出的是,光斑分析法和光谱分析法只能定性地反映出轴上光强的变化,其定量的描述都不准确,更加精确的测量需要用专业的亮度仪或者精密型光强测试仪。由于实验条件的限制,仅能用上述两种方法来间接地做定性分析。

## 4 结 论

光纤激光器相干合成技术是获得高功率和高亮度激光输出的一种有前途的技术途径。从目前所报导的光纤激光器相干合成方案来看,耦合器干涉锁相方案结构最为简单。然而光纤耦合器并非大功率器件,不能承受高功率,而且耦合器方案是将多根光纤输出的激光通过干涉原理耦合进一根光纤,其输出功率最终还是受限于单根光纤的功率承受能力,未能突破单根光纤的功率限制,制约了该方案的发展前途。本文采用类似光纤耦合器干涉锁相的合成原理,利用一块  $45^\circ$  半透半反分束镜作为干涉元件,替代光纤耦合器,并使合成输出激光在自由空间传播,成功实现了两路光纤激光器的相位锁定,使两路光纤激光器在输出端相干相长,获得了功率为 360 mW 的相干合成激光输出,功率合成效率约为 73%。此装置利用了光纤耦合器干涉锁相的相同原理,但却避免了光纤耦合器承受功率低的缺点,可实现更高功率的相干合成激光输出,并且是将两路光纤激光耦合为同一光路在自由空间中输出,具有广泛的应用前景,是一种有前途的高功率光纤激光器相干合成方案。

## 参考文献:

- [1] ANDEREGG J, BROSAN S, CHEUNG E, *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [J]. *SPIE*, 2006, 6102: 61020U-1-61020U-5.
- [2] GOODNO G D, KOMINE H, MCNAUGHT S J, *et al.*. Coherent combination of high-power zigzag slab lasers [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [3] PENG Q, ZHOU Y, CHEN Y, *et al.*. Phase locking of fibre lasers by self-imaging resonator [J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(4): 171-172.
- [4] 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.
- [5] BOCHOVE E J, CHEO P K, KING G G. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt.*

*Lett.*, 2003, 28(14):1200-1202.

- [6] AKIRA S, TOMOHARU S, TOMOKI S, *et al.*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2002, 10(21):1167-1172.
- [7] CHEN SH P, LI Y G, LU K CH, *et al.*. Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2003, 13(20):7878-7883.
- [8] AKIRA S, KEIGO M, KEN-ICHI U. Fiber laser coherent array for power scaling of single-mode fiber laser [J]. *SPIE*, 2004, 5662:482-487.
- [9] ISHAAYA A A, ECKHOUSE V, SHIMSHI L, *et al.*. Intracavity coherent addition of single high-or-

der modes [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14):1770-1772.

- [10] ISHAAYA A A, DAVIDSON N, SHIMSHI L, *et al.*. Intracavity coherent addition of Gaussian beam distributions using a planar interferometric coupler [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(12):2187-2189.
- [11] 王建明, 段开棕, 王屹山. 两光纤激光器相干合成的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(9):5627-5631.
- WANG J M, DUAN K L, WANG Y SH. Experimental study of coherent beam combining of two fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(9):5627-5631. (in chinese)

#### 作者简介:



王会升(1953—),男,河南宁陵人,副教授,1976年毕业于长春光学精密机械学院光学材料专业,主要从事光学系统方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net



丁方正(1972—),男,湖北沙洋人,讲师,1985年于解放军军械工程学院获得学士学位,主要从事光学仪器维修等方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net



刘洋(1981—),男,四川达州人,博士,讲师,2003年于长春理工大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光纤激光器相关技术的研究。E-mail: lyssym@126.com



米朝伟(1972—),男,山东临沂人,硕士,2005年于临沂师范学院获得学士学位,2008年于解放军信息工程大学获得硕士学位,主要从事光学混沌方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net



韦尚方(1981—),男,江苏赣榆人,讲师,2003年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事激光测距机等方面的研究。E-mail: wsf166@126.com



程勇(1961—),男,山西玉山人,博士,教授,1982年毕业于石家庄高级军械学校光学仪器系,2002年于中科院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事军用激光器相关技术的研究。E-mail: gdyjs@263.net