

# 两个光纤激光器的互相注入锁定<sup>\*</sup>

陈子伦 侯 静 周 朴 刘 亮 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2007 年 3 月 15 日收到,2007 年 5 月 23 日收到修改稿)

光纤激光器的相干合成技术是实现高功率、高亮度光纤激光系统的重要技术途径. 利用分束器分光使两个光纤激光器的能量互相注入,从而使两个光纤激光器达到锁相锁模实现相干输出. 实验研究表明:在独立运行的情况下,两个光纤激光器的远场光斑只是两个激光器光强的简单叠加;在互相注入锁定的情况下,两个光纤激光器的远场光斑是具有高对比度的干涉条纹,并得到两个激光器的输出模式总为异相模. 这与理论分析的结果相一致.

关键词:光纤激光器,相干合成,锁相

PACC:4281W,4225K,4281P

## 1. 引 言

光纤激光器是近几年来光电子领域的研究热点之一. 近年来,随着高亮度半导体二极管抽运技术的不断成熟,单根光纤激光器的输出功率得到迅速提高,千瓦级的光纤激光器<sup>[1]</sup>已经研制成功. 但是,掺杂光纤的非线性效应、光学损伤、热损伤等物理机制限制了单根光纤激光器的输出功率. 要想保证光束质量并进一步提高输出功率就需要采用相干合成技术. 目前国内外已经提出多种相干合成技术,如并联主振荡功率放大(MOPA)系统<sup>[2]</sup>、多芯光纤自组织<sup>[3]</sup>、全光纤组束<sup>[4]</sup>、傅里叶透镜外腔<sup>[5]</sup>等等. 一般而言,采用 MOPA 方案制作光纤激光器阵列需要有相位监测和控制电路,系统相当复杂,且成本高,实现难度大. 采用多芯光纤输出端直接耦合法制作光纤激光器阵列能够实现的光纤激光器数目有限,输出端热效应突出,难以获得大功率激光输出. 全光纤合成采用光纤耦合器将多根光纤的输出激光组合到一根光纤,但最终还是受限于单根光纤的功率承受能力. 采用傅里叶透镜法制作光纤激光器阵列要求光纤激光器的排列满足自再现函数的要求,自再现函数为高斯函数和梳状函数,这给光纤激光器阵列输出端的排布定位和输出功率分布提出了很高的要求,且反馈能量损失大,能量利用率相

对低.

本文通过分束器分光实现了两个光纤激光器的互相注入锁定,此方法不需要相位监测和控制,对两个光纤激光器的输出功率没有特殊要求,并有很好的拓展性,可以实现高功率运行.

## 2. 实验装置

两个光纤激光器互相注入锁定的实验光路见图 1. 实验系统由两个对 1550 nm 光高反的光栅、两段长度为 5 m 掺铒单包层增益光纤、两台 980 nm 的抽运源、两个 80/20 的光纤分束器、对 1550 nm 光高反的反射镜组成. 两个光纤激光器分别命名为激光器 1 和激光器 2. 光纤激光器 1 的光进入到分束器后,80%的光经光纤准直器射到高反镜上,其中一部分光作为激光输出,反射的光进入到准直器经合束器再到掺杂光纤,从而实现了激光的反馈,高反镜和光栅构成了激光器的两个腔镜. 分束器另外 20%端口的光进入到激光器 2 中,同样,激光器 2 的一部分光经分束器进入到激光器 1 中. 这样,两个光纤激光器的能量实现了互相注入,从而使两个光纤激光器锁模锁相达到相干输出. 在输出镜的后面加一凸透镜,通过光斑仪观察两个激光器运行时的远场光斑,判断两个激光器是否实现了互相注入锁定.

<sup>\*</sup> 国家杰出青年科学基金(批准号:60608008)和国防科学技术大学预研基金(批准号:JC05-07-04)资助的课题.

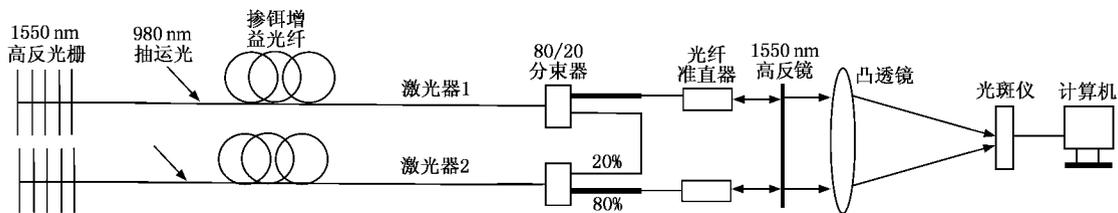


图 1 实验装置示意图

### 3. 实验结果

实验中所用的光纤都是单模光纤,因此两个激光器单独开启时的远场光斑为基模高斯光斑.两个激光器单独开启运行时的远场光斑如图 2 所示.

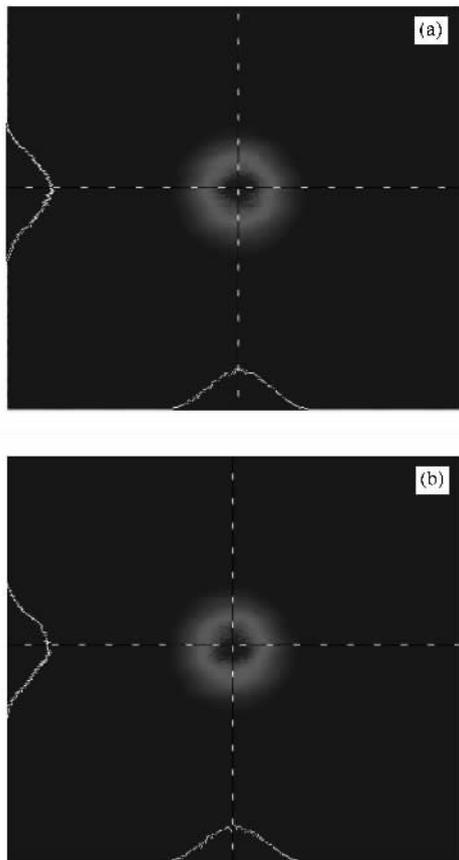


图 2 单个光纤激光器单独运行时的远场光斑 (a)激光器 1, (b)激光器 2

单几何叠加.图 3 (b)是两个激光器互相注入锁定情况下的远场光斑,两个激光器的远场光斑是具有高对比度的干涉条纹,说明两个激光器达到了互相注入锁定,实现了相干输出.通过干涉条纹分布可以看到有两个中心极大值,且中间为暗纹,这说明两个光纤激光器的输出模式为异相模.

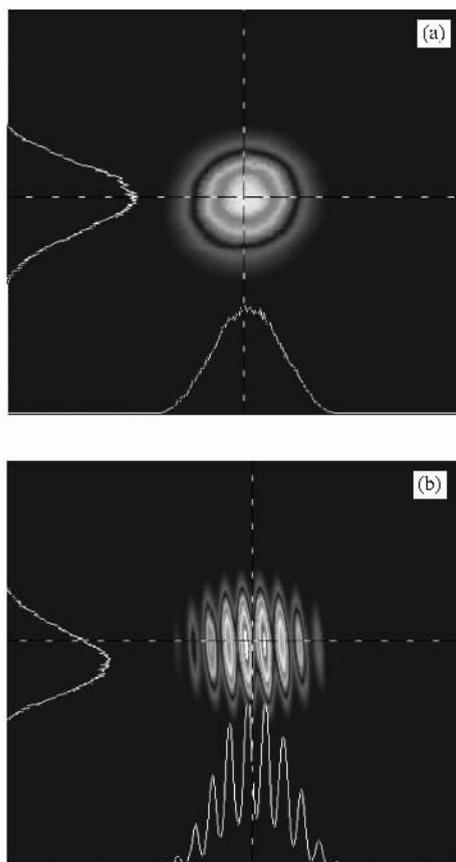


图 3 两个光纤激光器同时运行时的远场光斑 (a)独立运行, (b)注入锁定

### 4. 理论分析

两个激光器同时开启时的远场光斑见图 3.图 3 (a)是两个激光器同时独立运行情况下的远场光斑,因为两个激光器的相位差是随机的,所以两个激光器的远场光斑强度是两个激光器远场光斑强度的简

文献[ 6—8 ]提出了能量互相注入的两个单纵模、单横模激光器各自光场和增益的缓变方程如下:

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

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

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

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

式中  $E$  为光纤激光器内的光场,  $G$  为增益系数,  $a$  为衰减系数,  $\kappa$  为两个激光器光场之间的耦合系数,  $p$  为抽运系数,  $\omega$  为光纤激光器的运转频率,  $\tau_c$  为光子在谐振腔内往返一次所需的时间,  $\tau_f$  为上能级粒子的自发辐射寿命, 下标 1, 2 表示能量互相注入的两个激光器.

由于光纤激光器固有特性, 采用单模光纤很容易实现单纵模、单横模运转, 因此对于能量互相注入的光纤激光器, 可以用(1)–(4)式来描述. 令

$$E_1 = X_1 \exp(i\varphi_1),$$

$$E_2 = X_2 \exp(i\varphi_2),$$

其中  $X$  和  $\varphi$  分别代表光场的振幅和相位. 在实验中两个光纤激光器所用的抽运源和掺杂光纤的长度都相同, 因此可假设两个光纤激光器输出强度和增益系数都相等, 即

$$X_1 = X_2, \quad (5)$$

$$G_1 = G_2.$$

将(5)式代入到(1)–(4)式并整理化简后得到

$$\frac{d\Delta\varphi}{dt} = 2\kappa\tau_c^{-1} \sin\Delta\varphi + \Delta\omega, \quad (6)$$

式中  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ,  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  分别为两个光纤激光器之间的相位差和运转频率差. 又因为实验中所用的两个光栅相同, 因此两个激光器的运行频率差可近似为  $\Delta\omega = 0$ . 这样, 通过求解(6)式可以得到相位差  $\Delta\varphi$  的精确解析解. 随着时间的演化,  $\Delta\varphi$  收敛情况取决于  $\Delta\varphi$  的初始值  $\Delta\varphi_i$ . 当初始值  $\Delta\varphi_i > 0$  时,  $\Delta\varphi$  收敛到  $\pi$ ; 当初始值  $\Delta\varphi_i < 0$  时,  $\Delta\varphi$  收敛到  $-\pi$ ; 当初始值  $\Delta\varphi_i = 0$  时,  $\Delta\varphi$  收敛到零, 如图 4 所示. 计算中取  $\kappa = 0.05$ ,  $\tau_c = 1.67 \times 10^{-2}$  s.

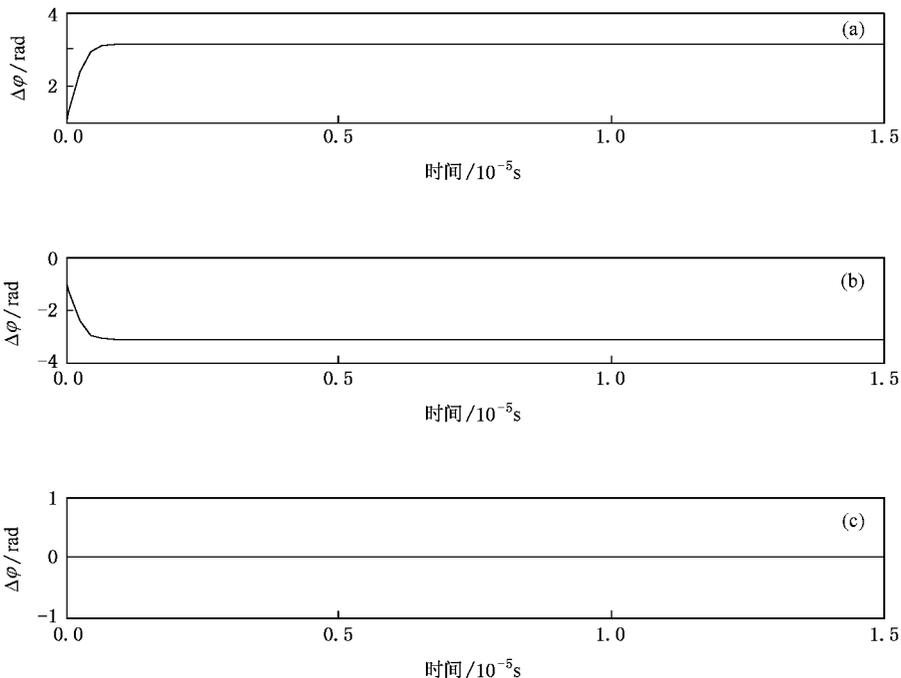


图 4  $\Delta\varphi$  随时间的演化关系 (a)  $\Delta\varphi_i > 0$ , (b)  $\Delta\varphi_i < 0$ , (c)  $\Delta\varphi_i = 0$

从图 4 可以看出, 当两个光纤激光器的  $\Delta\varphi_i = 0$  时, 通过能量互相注入, 输出的模式为同相模 (in-phase mode); 而当  $\Delta\varphi_i \neq 0$  时, 两个激光器的输出模式为异相模 (out-of-phase mode). 由于受到各种因素

的影响,  $\Delta\varphi_i = 0$  的条件很难得到满足, 因此两个光纤激光器在互相注入锁定的情况下, 输出模式总是异相模, 正如实验中所看到干涉条纹中有两个中心极大值, 且最中间为暗纹.

## 5. $N$ 个光纤激光器的互相注入锁定

本文提到的方法突破了利用光纤耦合器将多根光纤的输出激光耦合到一根光纤输出的限制,因为组合到一根光纤最终还是受限于单根光纤的功率承受能力. 本方法采用两个光纤输出端,这样在提高输出功率的时候,就可以减小单根光纤的相对输出

功率. 更值得关注的是,这种方法可以实现多个光纤激光器的互相注入锁定.  $N$  个光纤激光器的互相注入锁定实验光路见图 5. 利用分束器分光,激光器 1 和激光器 2 实现互相注入锁定,以此类推,  $N-1$  和  $N$  之间互相注入锁定. 这样,  $N$  个激光器互相之间进行了锁定,从而实现  $N$  个光纤激光器的相干输出. 图 5 中的输出准直器可以按照任意要求排列.

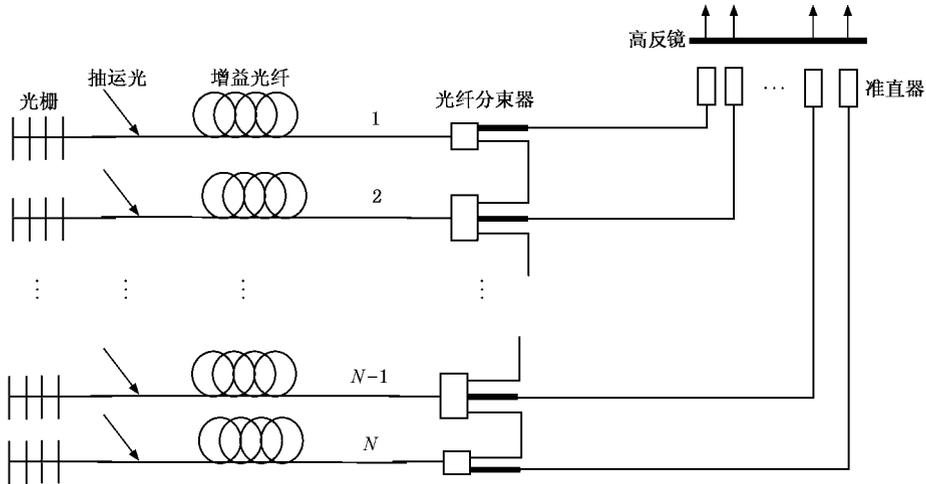


图 5  $N$  个光纤激光器的互相注入锁定光路图

## 6. 结 论

通过光纤分束器实现了两个光纤激光器能量互相注入,从而使两个光纤激光器锁相锁模,实现相干输出. 当两个光纤激光器独立运行时,两个激光器的远场光斑只是两个激光器光强的简单叠加. 在互相注入锁定的情况下,两个激光器的远场光斑是具

有高对比度的干涉条纹,说明两个激光器实现了互相注入锁定,并得到两个激光器的输出模式为异相模. 这与理论计算的结果相一致. 这种实现互相注入锁定的方法不需要相位监测和控制,对两个光纤激光器的输出功率没有特殊要求. 此方法还可以实现  $N$  个光纤激光器的互相注入锁定,可以实现高功率运行.

- [ 1 ] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [ 2 ] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6464 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 *物理学报* **55** 6464]
- [ 3 ] Bochove E J, Cheo P K, King G G 2003 *Opt. Lett.* **28** 1200
- [ 4 ] Sabourdy D, Kermene V, Berthelemot A D, Lefort L, Barthelemy A, Even P, Pureur D 2003 *Opt. Express* **11** 87

- [ 5 ] Corcoran C J, Pash K A 2005 *Appl. Opt.* **7** 1
- [ 6 ] Thornburg K S, Möller M, Roy R, Carr T W, Li R D, Emeux T 1997 *Phys. Rev. E* **55** 3865
- [ 7 ] Fabiny L, Colet P, Roy R, Lenstra D 1993 *Phys. Rev. A* **47** 4287
- [ 8 ] Terry J R, Thornburg K S, De Shazer D J, Van Wiggeren G D, Zhu S Q, Ashwin P 1999 *Phys. Rev. E* **59** 4036

# Mutual injection locking of two individual fiber lasers<sup>\*</sup>

Chen Zi-Lun Hou Jing Zhou Pu Liu Liang Jiang Zong-Fu

(*School of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 15 March 2007; revised manuscript received 23 May 2007)

## Abstract

Coherent beam combination of fiber laser array is an important technology in realizing high power fiber laser systems. Mutual injection locking of two fiber lasers was achieved by a fiber coupling apparatus. Through experiments, we conclude that in the free running state the beam profile is the simple intensity superposition as expected of two incoherent beams, but in the mutual injection locking, interference fringes with high contrast ratio was obtained, showing good mutual coherence between two laser beams. Through the interference fringes, we concluded that the two lasers are always in the out-of-phase mode, as predicted by theory.

**Keywords**: fiber laser, coherent combining, phase-locked

**PACC**: 4281W, 4225K, 4281P

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Scholars of China (Grant No. 60608008) and the Advanced Research Foundation of National University of Defense Technology, China (Grant No. JC05-07-04).