

# 谱线和耦合系数对光纤激光器相互注入锁定的影响<sup>\*</sup>

陈子伦<sup>†</sup> 周 朴 许晓军 侯 静 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 8 月 10 日收到,2007 年 9 月 28 日收到修改稿)

相互注入锁定是相干合成技术中最具发展前景的方案之一. 在两个光纤激光器相互注入锁定的基础上,利用可调节光纤光栅改变其中一个激光器的中心谱线和利用不同的分束器改变两个激光器间的耦合系数,同时监测两个激光器的远场光斑和谱线,判断激光器谱线和耦合系数对相互注入锁定的影响. 通过理论和实验得到,提高耦合系数可以提高锁定的频率差,两个激光器的谱线越接近锁定的效果越好,当激光器的谱线超过一定范围时,两个激光器将不能被锁定.

关键词:光纤激光器,相干合成,相位锁定

PACC:4281W,4225K,4281P

## 1. 引 言

光纤激光器的相干合成是获得高功率和高亮度激光输出的有效途径,是激光技术发展的重要方向之一. 相干合成的基本思想是对多个输出激光束进行合成叠加,通过控制激光的相位,使得各激光束保持相位一致,从而得到高亮度的相干光束输出.  $N$  个光纤激光器实现相干合成可以将峰值功率提高  $N^2$  倍. 相干合成技术在实现方式上可以分为主动控制和被动锁模技术:主动控制实现的相干合成以并联主振荡功率放大(MOPA)系统<sup>[1]</sup>为代表;被动锁模技术实现的相干合成主要有以下几种<sup>[2-4]</sup>:多芯光纤相互注入,全光纤组束,傅里叶透镜外腔法等等. 在被动锁模实现的相干合成中,激光器间的相互注入锁定是最具有发展前景的方案之一,此方法不需要位相监测和控制,对各激光器的能量没有特殊要求. 前面我们已经通过光纤耦合器实现了两个激光器的相互注入锁定,并分析了两个激光器锁定后的远场光斑<sup>[5]</sup>,但没有考虑激光器谱线和耦合系数对光纤激光器相互注入锁定的影响.

在本文中,我们重新设计了实验光路,用一个可调节的光纤光栅代替原来的不可调光纤光栅,利用不同分光比的分束器改变激光器间的耦合系数,同

时对两个激光器的远场光斑和谱线进行测量,从而确定激光器谱线和耦合系数对光纤激光器相互注入锁定的影响.

## 2. 实验装置

两个光纤激光器相互注入锁定的实验光路见图 1. 实验系统由一个对 1550 nm 光高反的光栅,一个手动可以调节中心波长可调节光纤光栅,两段长度为 5 m 掺铒单包层增益光纤,两台 980 nm 的抽运源,80/20 和 50/50 的光纤分束器各两个,以及一个耦合器组成. 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 1,2 的光进入到分束器后一端接准直器输出,其中准直器中光纤端面的 4% 菲涅耳反射和前面的光栅构成激光器的谐振腔,两个准直器输出的光经透镜聚焦后利用光斑仪检测两个激光器的远场光斑;两个分束器的另外一端接二合一耦合器,耦合器的另一端经准直器后进入到光谱仪检测两激光器的光谱,准直器中光纤端面的 4% 菲涅耳反射的能量返回到两个激光器中,使两个激光器中的能量实现相互注入. 同时用光斑仪和光谱仪检测两个激光器的远场光斑和光谱,调节一个激光器的中心谱线和改变分束器的分束比确定激光器谱线和耦合系数对光纤激光器相互注入锁定的影响.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号:60608008)和国防科技大学校预研(批准号:JC05-07-04)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zilun1978@yahoo.com.cn

在实验中首先用两个 50/50 的分束器,此时两个激光器间的耦合系数为 2%。然后将两个 50/50 分束器换为两个 20/80(分光比为 20% 的端口接耦合器,

80% 的端口接准直器输出)的分束器,此时两个激光器间的耦合系数变为 0.8%,这样利用不同的分束器改变了激光器间的耦合系数。

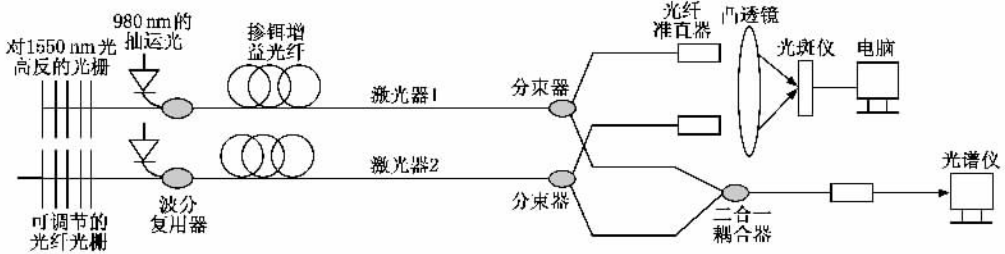


图 1 实验装置示意图

### 3. 理论分析

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:

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

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

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

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

其中,  $E$  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。我们令  $E_1 = X_1 \exp(i\varphi_1)$ ,  $E_2 = X_2 \exp(i\varphi_2)$ , 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,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

$$X_1 = X_2, G_1 = G_2. \quad (5)$$

将 (5) 式代入到 (1)–(4) 式整理化简得到

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

由文献 [5—8] 中的分析可知,在锁定的情况下两个

激光器的相位差将恒定,所以 (6) 式左边的两个激光器的相位差时间导数为零,这样由三角正弦函数式的取值范围,得到锁定的频率差

$$|\Delta\omega| \leq 2\kappa\tau_c^{-1}, \quad (7)$$

(7) 式说明,激光器间的耦合系数越大,相互注入锁定的两个激光器允许的频率差越大。实验中不同分束器实现的激光器间的耦合系数分别为 2% (50/50 分束器) 和 0.8% (20/80 分束器),计算可以得到锁定的频率范围为 1.2 和 0.48 MHz。

### 4. 实验结果

两个激光器同时开启,并且输出的强度基本一致时,改变激光器 2 可调节光纤光栅的中心波长和利用不同的分束器改变耦合系数得到的两个激光器相互注入锁定后的远场光斑和光谱见图 2—5。

其中图 2 是当两个激光器的谱线重合时的光谱和远场光斑图,此时两个激光器的远场均为对比度较高的干涉条纹,条纹中间为暗纹说明两个激光器的输出模式为异相模,这在文献 [5—8] 中做了详细的理论分析,在此不作赘述。图 2(b) 用分光比为 50/50 的分束器时两个激光器的远场光斑,条纹可见度达到了 70%,并且实验中的谱线和光斑很稳定,说明两个激光器之间达到了较好的锁定。图 2(c) 是利用 20/80 的分束器得到的远场光斑图,与 50/50 的分束器相比只是降低了两个激光器间的耦合系数,这时条纹虽然清晰,但是条纹可见度已有了明显的降低,达不到 20%,说明耦合系数的减小降低了激光器之间的锁定效果。

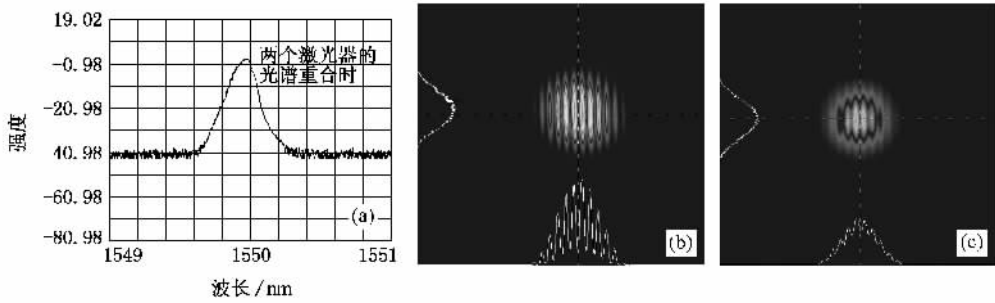


图 2 两个光纤激光器同时运行下的光谱和远场光斑 (a)两个激光器光谱一致时的锁定光谱图 (b)分束器分光比为 50/50 时的远场光斑 (c)分束器分光比为 80/20 时的远场光斑

当两个激光器的中心谱线相差 0.2 nm 时,两个激光器在不同耦合系数下的谱线和远场光斑见图 3,图 3(b)用分光比为 50/50 的分束器时,两个激光器的远场光斑,条纹清晰,但是可见度已不能与图

2(b)中条纹的可见度进行比较,由于两个激光器谱线的远离,降低了激光器的锁定程度.而用 20/80 分光比时,两个激光器的远场光斑只能隐约看到有相干的迹象,条纹的可见度几乎为零.

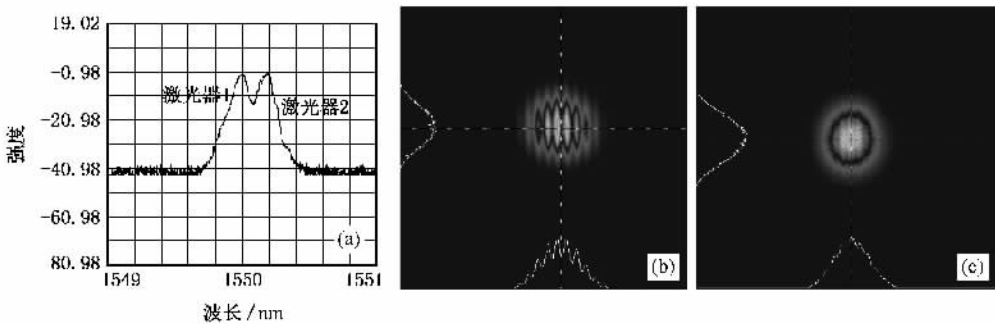


图 3 两个光纤激光器同时运行下的光谱和远场光斑 (a)两个激光器中心波长相差 0.2 nm 时的锁定光谱图; (b)分束器分光比为 50% 时的远场光斑 (c)分束器分光比为 20% 时的远场光斑

继续增大两个激光器的中心谱线,使其相差 0.3 nm 时两个激光器在不同耦合系数下的远场光斑见图 4,由于两个激光器的谱线进一步远离,使两个

激光器的锁定程度进一步降低,这样两个激光器的远场光斑条纹在不同的耦合系数下变得隐约可见(图 4(b))和完全消失(图 4(c)).

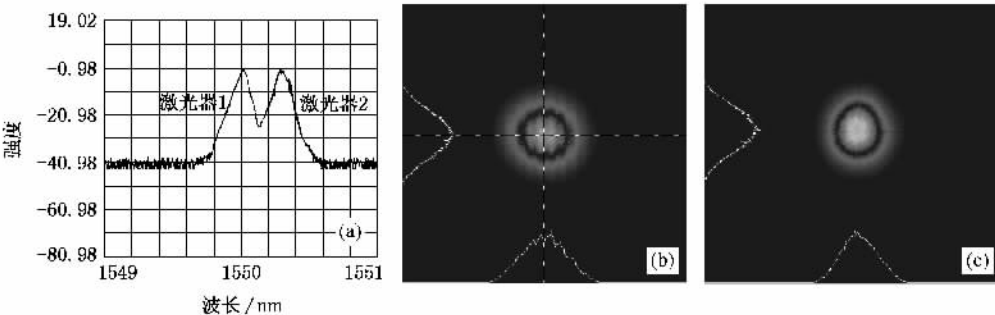


图 4 两个光纤激光器同时运行下的光谱和远场光斑 (a)两个激光器的中心谱线增至 0.3 nm 时的锁定光谱图; (b)分束器分光比为 50% 时的远场光斑 (c)分束器分光比为 20% 时的远场光斑

当两个激光器的光谱进一步增大,两个激光器将变得完全不相关,它们的远场光斑只是两个激光

器的远场光斑的简单叠加,这时的光谱和远场光斑见图 5.

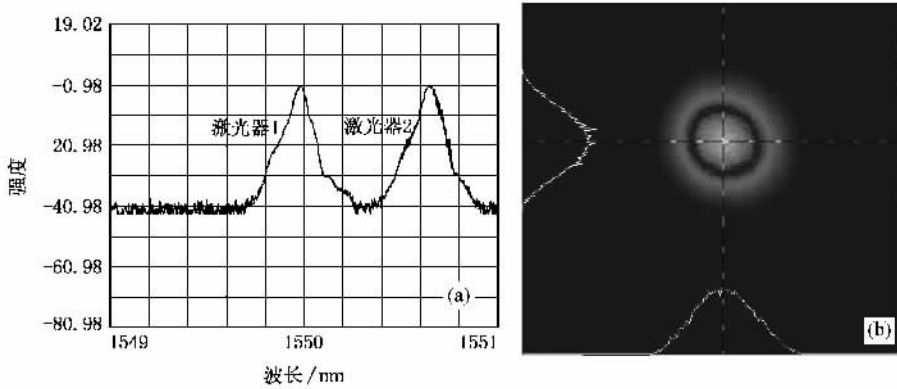


图5 两个光纤激光器同时运行下的光谱和远场光斑 (a)两个激光器的中心谱线增至0.7 nm时的锁定光谱图 (b)分束器分光比为50%时两个激光器的远场光斑

通过上面的实验我们可以得到 提高耦合系数可以增加激光器间的锁定效果,两个激光器的谱线越接近,耦合系数越大锁定后的相干结果越好,当两个激光器的频率差超过锁定的范围时,两个激光器将变得完全不相关.实验结论和理论分析的结果相一致.

## 5. 结 论

在利用光纤耦合器实现的两个光纤激光器能量

相互注入锁定的基础上,通过改变一个激光器的中心谱线和耦合系数分析激光器谱线和耦合系数对相互注入锁定的影响.当两个光纤激光器的谱线一致时,两个激光器的锁定结果随着耦合系数的增加而稳定,随着两个激光器谱线之间距离增大,锁定的效果逐渐变差,直到条纹完全消失.要想通过相互注入锁定实现稳定的、可见度高的干涉条纹,激光器的谱线应当尽量一致,一致性越好锁定的结果越好;中心谱线差超过锁定范围时,将不能实现锁定.

- [1] 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]
- [2] Bochove E J, Cheo P K, King G G 2003 *Opt. Lett.* **28** 1200
- [3] Sabourdy D, Kermene V, Berthelemot A D, Lefort L, Barthelemy A, Even P, Pureur D 2003 *Opt. Express* **11** 87
- [4] Corcoran C J, Pash K A 2005 *Appl. Opt.* **7** 1
- [5] Chen Z L, Hou J, Zhou P, Liu L, Jiang Z F 2007 *Acta Phys. Sin.*

- 56** 7046 (in Chinese)[陈子伦、侯 静、周 朴、刘 亮、姜宗福 2007 物理学报 **56** 7046]
- [6] Thornburg K S, Möller M, Roy R, Carr T W, Li R D, Erneux 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, DeShazer D J, Van Wiggeren G D, Zhu S Q, Ashwin P 1999 *Phys. Rev. E* **59** 4036

# The influence of spectral lines and coupling coefficient on mutual injection locking of fiber lasers<sup>\*</sup>

Chen Zi-Lun<sup>†</sup> Zhou Pu Xu Xiao-Jun Hou Jing Jiang Zong-Fu

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

(Received 10 August 2007; revised manuscript received 28 September 2007)

## Abstract

Mutual injection locking is recognized as one of the most important and promising research directions for the fibre laser combining technology. Basing on the mutual injection locking of the two fiber lasers, the far field and the spectra of the two fiber lasers were inspected by infrared CCD and optical spectrum analyzer when the spectrum of one fiber laser and the coupling coefficient were changed. From the experiment, we conclude that the stronger was the mutual injection locking when the closer the spectra of the two fiber laser are; and the mutual injection locking would fail when the difference in the frequencies exceeds the locking range, which can be extended by increasing the coupling coefficient of the fiber lasers.

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

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

---

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

<sup>†</sup> E-mail: zilun1978@yahoo.com.cn