

文章编号: 1001-5078 (2006) 10-0921-04

光纤激光器相干组束技术研究

赵 帅, 范万德, 盛秋琴

(南开大学物理科学学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘 要: 全面介绍了光纤激光器相干组束技术的发展现状, 对注入锁定现象给出了相应的理论解释。并对该技术的优点、缺陷进行了详细的分析。

关键词: 全光纤; 相干组束; 光纤激光器; 迈克耳逊谐振腔; M-Z 谐振腔

中图分类号: TN248.1; TN253 **文献标识码:** A

The Research of Coherent Combining of Fiber Laser

ZHAO Shuai, FAN Wan-de, SHENG Qiu-qin

(Department of photoelectric information, Science of Physics institute, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In the paper some newly developed technologies on all-fiber coherent beam combining are introduced theoretical explanation of injection locking is given based on the simulation. The advantages and limitations of the technique are analyzed detailedly

Key words: all-fiber; coherent beam combining; fiber laser; Michelson resonator; M-Z resonator

1 引言

产生高强度激光是激光物理研究重要课题之一。解决该问题的一条重要途径就是将 N 束激光进行相干叠加, 可以得到输出激光的强度是每束光强的 N^2 倍。

光纤激光器以其体积小, 高转换效率和优良的温度特性得到了广泛应用, 为了得到高强度的激光输出, 最近许多文章报道了光纤激光器的相干组束技术的进展。

本文主要介绍全光纤自组织、干涉型耦合谐振腔结构相干组束技术的发展现状。

2 迈克耳逊型结构

1999 年, V. A. Kozlov 等人首先报道了全光纤迈克耳逊型激光器^[1], 整套装置的示意如图 1 所示。

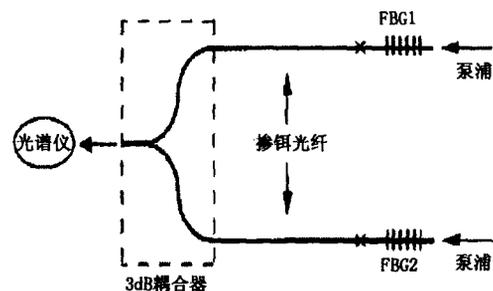


图 1 迈克耳逊激光器示意图

实验中测量到的光谱如图 2 所示, 在室温条件下, 由于两个光栅的谐振波长不同, 导致了激光器的光谱出现两个谐振峰。随着温度的升高 (在 27 ~ 50) 范围内, FBG2 的谐振波长向长波方向

作者简介: 赵 帅 (1981 -), 男, 硕士生, 主要从事光纤通信器件研究。E-mail: zs040148@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-04-13; 修订日期: 2006-09-14

移动,如图 2 中 (b)所示。随着温度升高,激光的输出功率增大,如图 2 中 (c)所示。FBG2 的谐振波长与 FBG1 相同时,激光功率输出达到最大,如果温度继续升高,随着 FBG2 的谐振波长再向长波方向移动,输出随之减小。实验中观察到当两个光栅的谐振波长相差 0.15nm 时,即开始发生注入锁定现象。

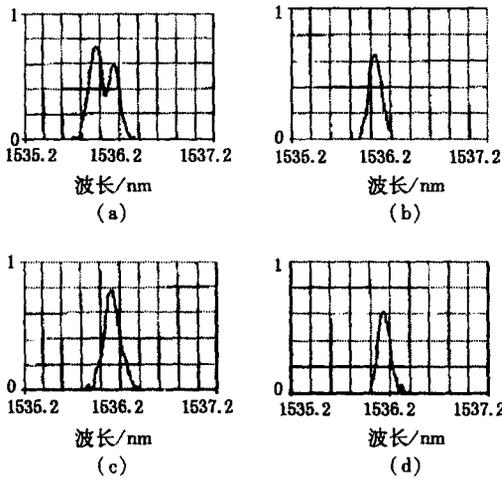


图 2 激光器输出光谱

为了解释这种注入锁定 (injection locking) 现象,我们利用光谱响应函数 $R_{eqn}(\nu)$,当迈克耳逊干涉谐振腔的每臂的增益和损耗相同时,整个系统的净增益将受到光谱响应函数的调制。通过对光谱响应函数的计算,可以对全光纤迈克耳逊激光器的输出光谱做简要的估计。图 3 是在实验中给定的参数条件下,进行的数值模拟,可以看出计算结果与实验现象是相符的^[2-5]。

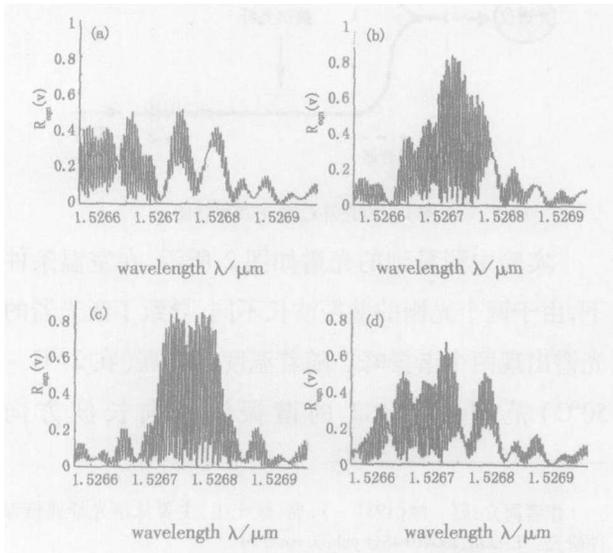


图 3 光谱响应函数 $R_{eqn}(\nu)$ 随波长的变化关系

2002 年,日本电气通信大学的 Akira Shirakawa 等人,利用输出波长为 1484nm,最大输出功率为 4.7W 的磷酸盐光纤激光器作为泵浦源,分别对两段长度约 6m 的单模铒光纤进行泵浦,实验装置示意如图 4 所示^[6]。

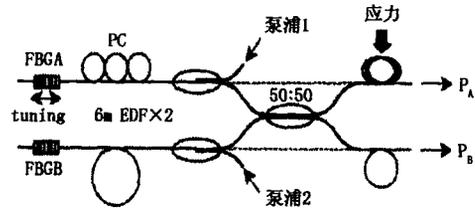


图 4 激光阵列 N=2 实验装置

文中对相干组束技术与独立的光纤激光器做了比较,从图 5 可以观察到输出功率随泵浦功率的变化关系。图中 $P_A(\text{coupled})$ 和 $P_B(\text{coupled})$ 为合成后 A 端和 B 端的输出功率, $P_A(\text{indep})$ 和 $P_B(\text{indep})$ 表示 A 和 B 作为单独激光器时的输出功率。泵浦功率为 2.05W 时, $P_A(\text{indep})$ 和 $P_B(\text{indep})$ 的输出为 1.36W 和 1.47W;合成之后, $P_A(\text{coupled})$ 和 $P_B(\text{coupled})$ 最大输出分别为 2.57W 和 0.17W,合成效率达到了 90%。整个过程中并没有观察到非线性效应,并且 A 输出端和 B 输出端输出的光谱形状基本上相同。

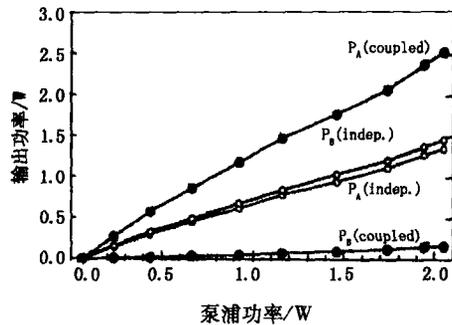


图 5 输出功率随泵浦功率变化曲线

2005 年 7 月, Akira Shirakawa 等人在做多路激光相干组束时发现了这种自组织结构相干组束技术的限制^[7]。其结构示意图如图 6 所示。

当随着组束激光器的臂数 N 增大时,合成效率并不是固定不变的,合成效率随着臂数 N 的变化曲线如图 7 所示。

出现这种现象的主要原因是,当做两路激光组束时并没有考虑到激光介质的空间烧孔现象,也没

有考虑到增益谱线形状的影响。由于以上原因,不能保证每个单独的激光器在相同纵模的重叠,这样将导致合成效率的降低。

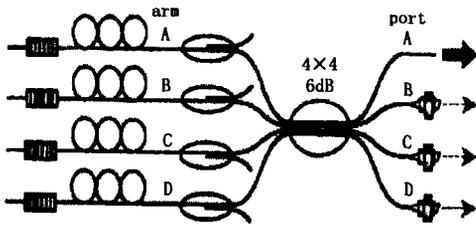


图 6 激光阵列 N=4 实验装置

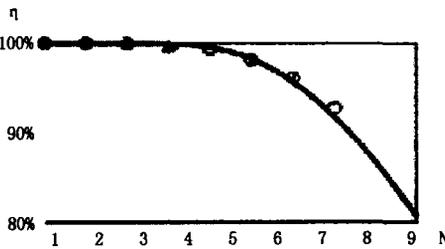


图 7 合成效率随臂数 N 的变化曲线

以上几种迈克耳逊型的结构对两路光束进行耦合,都得到了较高的耦合效率,并且保证了输出光束的质量。V. A. Kozlov等人的实验,通过温度调整其中一个 FBG的谐振波长,注重观察了注入锁定现象;而 Akira Shirakawa等人通过应力来调谐 FBG的谐振波长,同样观察到了注入锁定现象的存在,而且更注重在调谐过程中,输出端功率的变化。对于扩展到 N臂时,如何精确调整腔长,使所有激光器的振荡频率相同,将是相干组束技术发展的重要难题。

3 马赫 - 曾德尔 (M - Z)型结构

2003年, David Sabourdy为自组织相干组束提供了一种新的实验方法^[8]。利用 M - Z干涉谐振腔代替迈克耳逊干涉谐振腔,得到了更高的耦合效率。实验示意图如图 8。

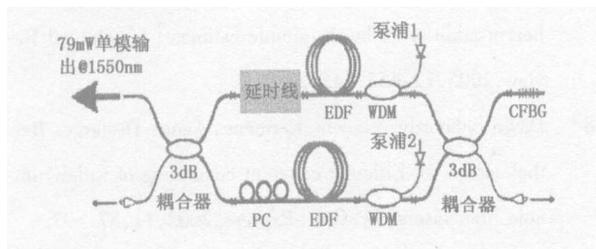


图 8 M - Z光纤激光器实验装置

图 9给出不同组态的功率特性。在最大泵浦 (P_p = 100 ×2)的情况下,输出最大为 79mW。接近

单个光纤激光器输出功率 (40mW)的两倍。斜口端输出的功率小于 0.6mW,合成效率 $\eta_L = P_{out} / (P_{out} + P_{leak}) = 99\%$ 。从中还可以观察到三种组态的激光器几乎有着 44%相同的斜率效率,说明合成效率已经达到了最大,也证明在斜口端输出的光功率达到了最小。

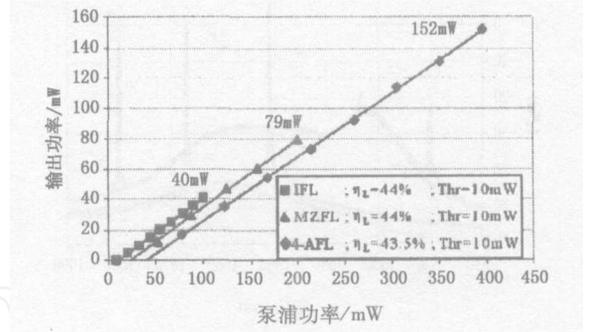


图 9 不同组态的功率特性

图 10为 M - Z型光纤激光器 (MZFL)的输出光谱。可以观察出,随着干涉谐振腔光程差 L的减小, MZFL的输出光谱展宽,展宽范围限定在啁啾光纤光栅 CFBG的谐振带宽内。由于外部的扰动轻微地改变了干涉谐振腔的光程差。所以谐振频率在 CFBG的带宽内随机出现。

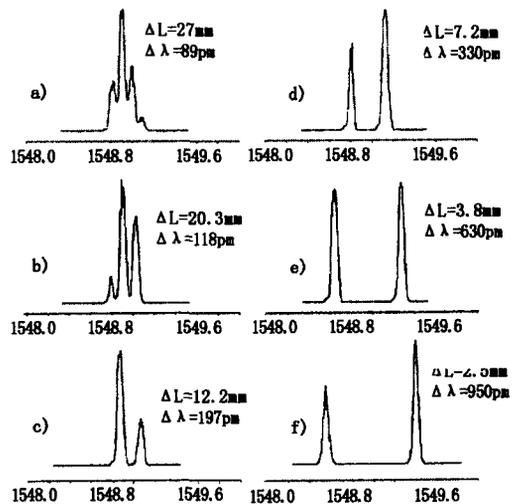


图 10 不同光程差下 MZFL的输出光谱

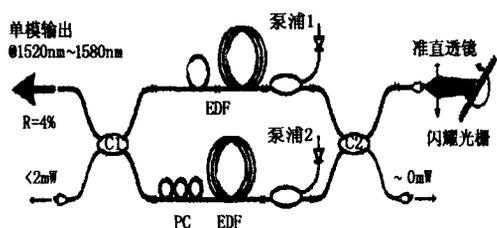


图 11 可调 MZFL实验装置

图 11 是利用闪耀光栅作为选频原件,实现波长可调激光输出的 MZFL 实验装置。只要调节光栅的角度,就可实现对不同波长的选频,得到不同波长的激光输出。图 12 为 5 种不同光栅角度下得到的 MZFL 输出光谱。

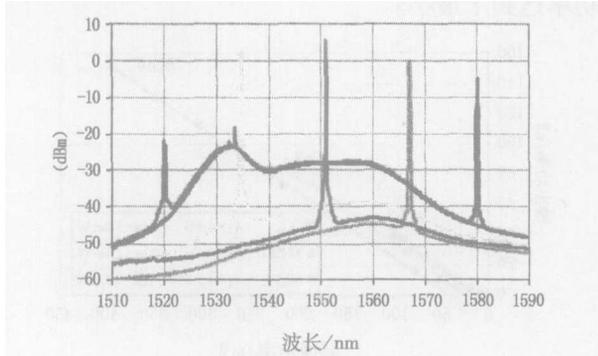


图 12 5 种不同光栅角度下得到的 MZFL 输出光谱

2005 年, Sheng - Ping Chen 提出了利用带通可调谐滤波器作为选频器件的 MZFL^[9], 如图 13 所示, 实验研究比较了带通可调谐滤波器不同插入位置, 对激光输出的影响。

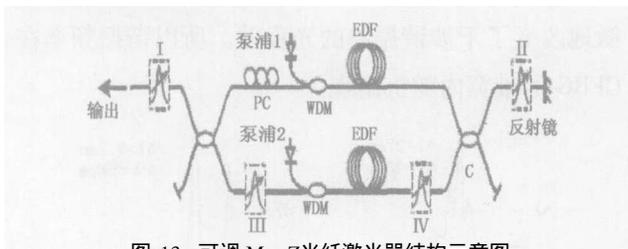


图 13 可调 M - Z 光纤激光器结构示意图

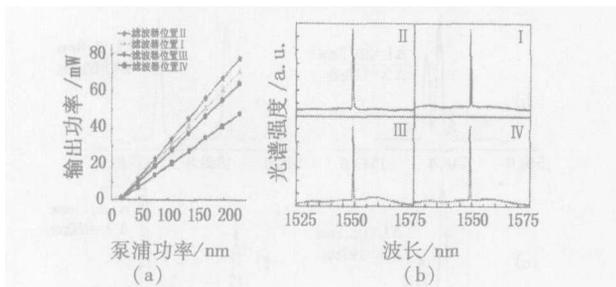


图 14 可调 MZFL 输出功率和输出光谱

图 14 为选频器件位于不同位置测得的输出功率和光谱。可以看出,带通可调谐滤波器在图 14 中所示的四个不同位置时,有基本相同的输出光谱,说明滤波器的位置不同并不影响光谱的形状。而输出功率由于带通滤波器的位置不同,有着明显的变化,当滤波器处在高反射镜前时,如图 13 的位置时,有着最大的斜率效率,为 36%。

4 结 论

研究了目前相干组束技术中惯用的自组织、干涉型的耦合谐振腔结构,得出如下结论:利用迈克耳逊干涉谐振腔结构,需要有两个谐振波长相差非常小的光纤光栅,否则需要用温度、或者应力等方法改变其中一个 FBG 的谐振波长,以达到注入锁定。M - Z 干涉谐振腔的引用,有效解决了必须使用两个谐振波长相近的光纤光栅带来的问题,但是 M - Z 干涉谐振腔对臂长差要求比较严格,不容易控制。

参考文献:

- [1] V A Kozlov, J Hernandez-Cordero, T F Morse. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers[J]. Optics Letters, 1999, 24: 1814 - 1816
- [2] Pedersen C, Skettrup T. Signal-flow graphs in coupled laser resonator analysis[J]. J. Opt Soc Am. A, 1997, 14, 1791 - 1798
- [3] Simpson T B, Gavrielides A, Peterson P. Extraction characteristics of a dual fiber compound cavity[J]. Opt Express, 2002, 10, 1060 - 1073
- [4] W H Loh, B N Samson, L Dong, et al High Performance Single Frequency Fiber Grating-Based Erbium: Ytterbium-Codoped Fiber Lasers[J]. J. Lightwave Technol, 1998, 16: 114
- [5] P Mollier, V Ambruster, H Porte, et al Electrically tunable Nd³⁺-doped fibre laser using nematic liquid crystals[J]. Elect Lett, 1995, 31, 1248 - 1250
- [6] Akira Shirakawa, Tomoharu Saitou, Tomoki Sekiguchi et al Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. Opt Express, 2002, 10: 1667 - 1672
- [7] D Kouznetsov J Bossin, A Shirakawa et al Limits of coherent addition of lasers: simple estimate[J]. Optical Review, 2005, 12: 455 - 457.
- [8] David Sabourdy, Vincent Kemmène, Agnès Desfarges-Berthelot et al Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers[J]. Opt Express, 2002, 11: 87 - 97.
- [9] Sheng-Ping Chen, Yi-Gang Li, Ke-Cheng Lu, Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers[J]. Opt Express, 2005, 13: 7878 - 7883