

利用全光纤结构 Michelson 腔实现两路高功率双包层光纤激光器相干合成

朱亚东 肖虎 王小林 马阎星 周朴[†]

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011 年 4 月 21 日收到; 2011 年 5 月 27 日收到修改稿)

Michelson 腔技术是实现激光相干合成的有效方案. 利用 Michelson 腔技术, 实现了全光纤结构下的两路光纤激光器的相干合成, 获得了功率为 11.75 W, 效率为 95.76% 的相干输出. 实验研究了相干合成效率与激光腔长差的关系以及抽运对称性对相干合成效率的影响. 实验表明相干合成效率极易受激光腔长差的影响, 不同腔长差下相干合成效率差异可达 18% 以上, 且存在最佳腔长差; 抽运对称性对相干合成效率的影响在 2% 以内.

关键词: 光纤激光器, 相干合成, 全光纤, Michelson 腔

PACS: 42.55.Wd, 42.27.De

1 引言

随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺和高亮度激光二极管抽运技术的发展, 单根单模双包层光纤激光器的输出功率以惊人的速度迅速提高. 与其他种类的激光器以及常规固体激光器相比, 光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点, 能够获得高功率和高光束质量的激光输出. 而由于热损伤、非线性效应、光纤端面损伤、热透镜效应等因素的制约, 单根单模光纤激光器的输出功率不可能无限提升. 相干合成多个中等输出功率且光束质量良好的光纤激光被认为是克服上述困难以获得高亮度高平均功率光纤激光源的良好途径^[1-11].

近年来, 各国研究人员提出了多种光纤激光器的相干合成方案, 并做了大量理论与实验研究工作. 目前相干合成的技术方案主要可以分为主动相位控制和被动相位控制两种方案. 主动相位控制方法主要有外差法^[1]、随机并行梯度下降法^[2,3]、多抖动法^[4]等; 被动锁相技术方案主要有多芯光纤法^[5]、互注入法^[6]、环形反馈腔法^[7]、外腔相干组束^[8-11]等. 由于被动相干合成方法不需要任何相位控制元件和复杂的电路控制, 可以快速稳定地

实现多路激光相干, 结构简单、响应速度快, 在国内外越来越引起广泛关注. 其中利用 Michelson 干涉谐振腔 (下文简称 Michelson 腔) 技术相干合成相比于其他被动相干技术易于获得相干性较好的激光光束并可有效改善输出光束的光束质量^[12].

1999 年, Kozlov 等首次报道了全光纤 Michelson 腔型激光器, 并通过温度调制其中一个布拉格光栅 (FBG) 的谐振波长, 观测到了注入锁定现象^[13]. 2002 年, Shirakawa 等利用全光纤 Michelson 腔型激光器, 通过应力 FBG 的谐振波长, 同样观察到了相位锁定现象, 并获得 2.57 W 的相干输出功率^[14]. 2004 年, Sabourdy 等报道了利用 Michelson 腔对波长为 975 nm 的两路激光进行相干合成, 得到了功率较高的、光束质量优良的激光输出^[15]. 2007 年, Fridman 等对基于 Michelson 腔的光纤激光器做了相关研究, 在 300 mW 输出功率范围内, 对两路谐振腔进行了比较分析, 为优化激光器的性能提供了参考^[16]. 2010 年, 美国 Vytran 公司 Wang 等采用全光纤 Michelson 腔型激光器进行相干合成, 获得 50.1 W 的高功率输出, 这是目前国际上光纤激光自组织相干阵列的最高输出功率报道^[17].

在国内, 2005 年中国科学院理化所彭钦军等利用空间 Michelson 腔结构进行了相干合成实验,

[†] E-mail: zhoup203@163.com

获得瓦量级输出, 并验证该方案具有很好的阵元可拓展性^[18]. 2008年, 西安光机所王建明等实现了空间结构的两光子晶体光纤激光器的相位锁定, 获得了 47 W 的相干输出, 其中单台激光器的效率为 31.7%, 合成效率为 65%^[19]. 2008年, 武汉军械士官学校刘洋等同样采用空间结构的 Michelson 腔技术, 利用 45° 半反半透分束镜和角锥反射器实现两路光纤激光器的能量相互注入, 获得了超过 10 W 的相干合成激光输出, 功率合成效率为 76%^[20]. 但上述相干合成实验大都基于空间结构而非全光纤结构, 系统存在结构复杂、稳定性不佳等不足之处. 国内在全光纤结构相干合成方面也取得了一些成果: 2007年南开大学 Jia 等实现了两路掺铒激光器进行相干合成, 并在两路激光器单独运行时功率分别为 10.41 mW 和 8.69 mW 的情况下获得相干输出功率为 24.4 mW, 这也是国内采用全光纤 Michelson 腔结构相干合成所获得的最高输出功率报道^[21]. 在此基础上, 基于改进的 Michelson 腔也实现了两路、三路全光纤结构的相干合成: 2007年, 国防科技大学陈子伦等通过光纤分束器实现了两个光纤激光器能量互注入, 实现相干输出, 输出功率为 22 mW^[11]; 2008年, 国防科技大学雷兵等通过全光纤耦合环进行相互注入锁定, 实现了三路掺铒光纤激光器的被动相干组束、输出功率 92 mW 的稳定相干输出^[22]. 总体来说, 国内尚未实现基于全光纤结构的 Michelson 腔相干合成瓦量级以上的高功率输出.

全光纤 Michelson 腔结构相干合成还具有结构简单、易于实现的特点, 可以直接推广到某些对于输出功率需求在百瓦级的特殊波长激光系统

上. 例如在 3—5 μm 工作的激光雷达、探测、遥感、光电对抗以及要求在 589 nm 特殊波长下工作的激光导星系统等领域. 2010年初, 欧洲南方天文台 Taylor 等对三台 Raman 光纤放大器进行相干合成获得大于 50 W 589 nm 激光输出, 其相干合成方案即采用空间 Michelson 腔结构^[23]; 同年 4 月, 法国 Bloom 等利用 Michelson 腔结构成功实现两路量子级联激光器的相干合成, 激光中心波长 4.5 μm , 合成效率高达 85%^[24].

本文采用全光纤 Michelson 腔激光器结构, 对两路高功率双包层光纤激光器进行相干合成实验研究, 实现两路光纤激光器的相干合成, 在国内首次实现全光纤 Michelson 腔结构光纤激光相干合成高功率输出. 实验获得了功率为 11.75 W 的相干合成激光输出, 合成效率高达 95.76%. 利用该实验系统分析了激光腔长差和抽运对称性对相干合成效率的影响. 实验中没有明显非线性现象产生, 基于此实验装置, 采用更高功率的抽运源, 有望获得百瓦级高功率相干合成激光输出.

2 实验原理及装置

本文中采用的实验装置如图 1 所示. 两个光纤激光器分别由一个或两个 976 nm 的半导体抽运激光器抽运, 其中光纤激光器 1 由 LD₁ 抽运, 光纤激光器 2 由 LD₂₋₁ 和 LD₂₋₂ 抽运, 三个抽运源的最大输出功率均为 8.5 W (注: 这里两路激光器的抽运功率不对等, 是为后文研究抽运对称性对相干合成效率的影响而设计). 光纤激光器 1 由一个中心波长为 1082 nm 的高反光栅 HR₁ (反射率为 99.9%), 一

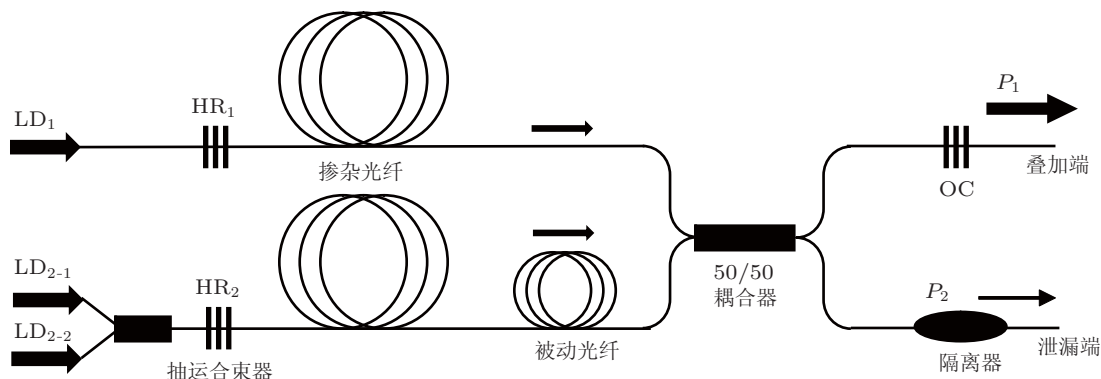


图 1 实验装置示意图

段长度为 8 m 的掺镱双包层增益光纤 (内纤芯直径为 11 μm, 外纤芯直径为 130 μm), 对 976 nm 抽运光的吸收系数为 5 dB/m, 光纤激光器 2 由一个中心波长为 1082 nm 的高反光栅 HR₂(反射率为 99.9%), 一段与光纤激光器 1 参数一致的增益光纤, 并接入不同长度的双包层被动光纤 (内纤芯直径为 10 μm, 外纤芯直径为 125 μm), 从而构成了全光纤 Michelson 腔结构. 两路光纤激光器的输出端分别接入一个 2 × 2 的分束比为 50/50 的耦合器的两个输入端, 并将耦合器输出端的一端接高透光栅 (OC, 反射率为 10%), 分别与 HR₁ 和 HR₂ 构成谐振腔作为功率叠加端; 输出端的另一端接隔离器作为功率泄漏端.

3 结果与讨论

按照实验装置图搭建系统, 首先搭建两路完全一致 (保证腔长一致、保证对称抽运) 激光器, 并进行优化直到获得稳定输出. 在未接入被动光纤时 (被动光纤长度为 0 m), 分别只开启 LD₁, LD₂₋₁ 和同时开启 LD₁, LD₂₋₁ 至最高输出功率 (8.5 W). 发现在相同的抽运功率下, P₁ 的输出功率 6.92 W, 明显大于 P₂ 的输出功率 1.03 W, 表明两路激光器实现了相干合成, 初步验证了系统的可行性. 为描述光束相干光束合成的效果, 引入参量相干合成效率 (η), 定义式如下:

$$\eta = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

其中 P₁ 为叠加端输出功率, P₂ 为泄漏端输出功率, 由此可得, 此时相干合成效率为 87.04%.

由于在实际情况中很难保证激光腔长的一致性以及抽运的对称性, 因此我们对这两个因素进行实验探究. 首先验证腔长差对相干合成效率的影响. 在其中一路激光器 (命名为激光器 2) 中分别接入不同长度的被动光纤, 并在对称抽运的条件下采用上述实验方法分别得出不同长度被动光纤情况下的相干合成效率, 如图 2 所示. 由此图分析可知, 存在一个最优值使得激光器达到最高的相干合成效率. 由于实验条件有限, 未能在更多点处进行测试, 但整体变化趋势已经清晰可辨, 综合各方面因素 (如熔接损耗不同等) 考虑, 可以推测该系统的被动光纤长度最优值在 8 m 附近.

其次, 我们通过实验验证抽运对称性对相干

合成效率的影响. 实验中采用的 976 nm 半导体抽运源最高输出功率均为 8.5 W, 为此定义对称抽运为两路激光器最大抽运功率都是 8.5 W; 定义非对称抽运为两路激光器最大抽运功率分别为 8.5 W 和 17 W. 分别选取 3 个有代表性的被动光纤长度进行试验, 在对称以及非对称抽运的条件下, 分别测量两个激光器单独工作和同时工作时的各端口输出功率, 从而计算得出相干合成效率, 如表 1 所示. 分析可知, 该方案中抽运对称性对相干合成效率影响不大, 在 2% 以内.

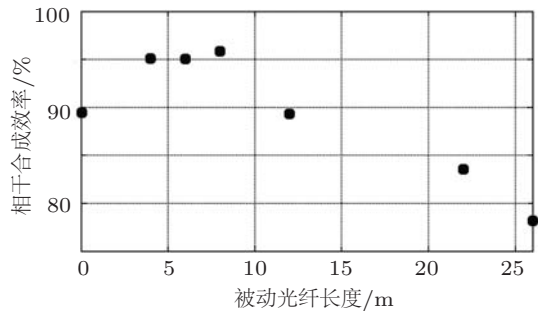


图 2 相干合成效率与被动光纤长度的关系

表 1 不同抽运条件下的相干合成效率比较

被动光纤长度/m	抽运方式	相干合成效率/%
0	对称抽运	87.04
	非对称抽运	88.67
8	对称抽运	95.85
	非对称抽运	95.76
22	对称抽运	82.72
	非对称抽运	80.97

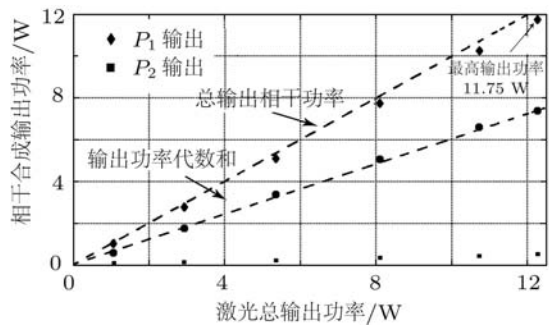


图 3 两路激光相干合束各端口输出功率关系与总输出功率的关系

通过以上分析, 我们对激光器进行了相关优化, 选取了 8 m 的被动光纤, 并结合现有的条件通过如图 1 所示的结构进行不对称抽运以达到最大抽运功率. 当两路激光器单独工作时, 倾斜效率分

别为 36.6% 和 27.58%，而在两台激光器同时工作时系统的倾斜效率为 48.59%，得到的最高输出功率为 11.75 W，对应的相干合成效率为 95.76%。相应的功率输出关系如图 3 所示。图中记录了相干合成时各输出端口的输出功率 (P_1 和 P_2) 与总输出功率 ($P_1 + P_2$) 的关系，以及单独工作时各激光器的功率输出的代数和与总输出功率的关系，图中上方虚线代表完全相干时的功率输出曲线，可以看出实验结果很接近该虚线，说明其相干性很好，下方虚线是通过各激光器的功率输出的代数和和拟合出的

结果。实验中激光器的输出功率随抽运功率的提升呈线性关系，没有明显非线性现象产生。

与此同时，利用型号为 Agilent 86142B 的光谱分析仪分别对两路激光器单独及同时运行的情况下进行了测定分析，如图 4 所示得到了稳定的激光输出。图 4(a) 为激光器 1 的激光光谱，图 4(b) 为激光器 2 的激光光谱，图 4(c) 为两激光器相干合成后的激光光谱。从光谱数据也可以看出，叠加端的输出功率得到了提升。除此之外，受激自发辐射 (ASE) 被抑制在 40 dB 以内，得到了有效的抑制。

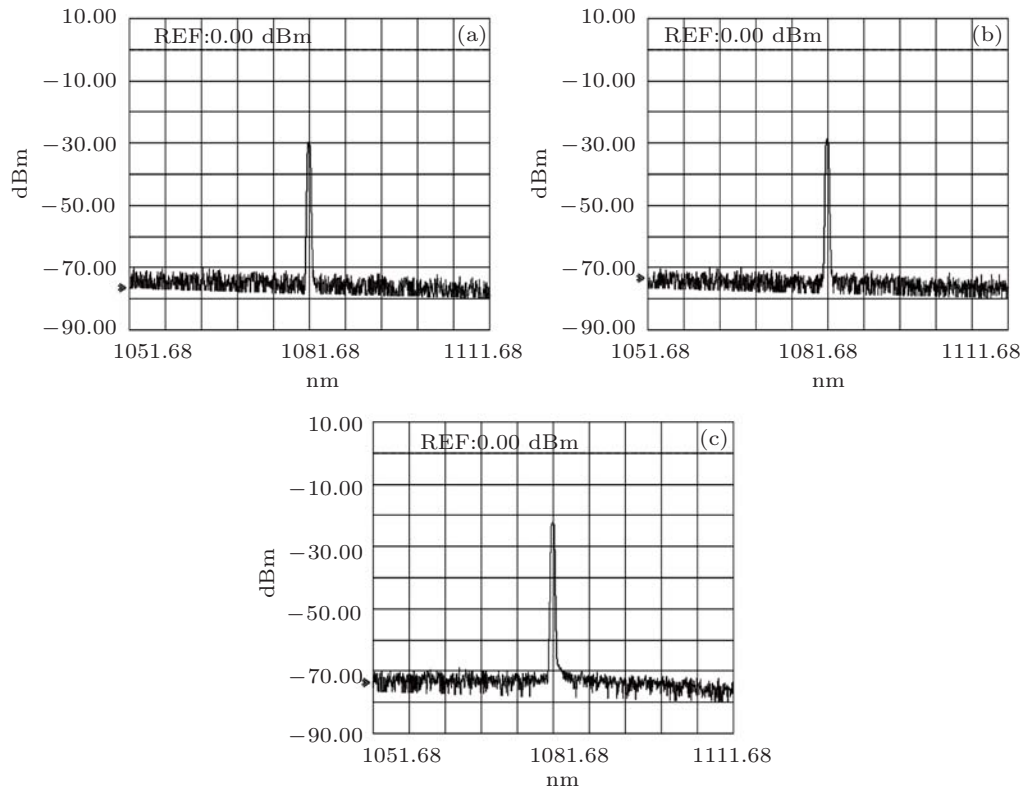


图 4 单光纤激光器和相干合成的激光光谱 (a) 激光器 1 的激光光谱; (b) 激光器 2 的激光光谱; (c) 两路激光器相干合成的激光光谱

4 结论

采用全光纤 Michelson 腔结构实现了两路双包层高功率光纤激光器相干合成，通过优化激光器腔长，获得了 11.75 W 的高功率输出，效率达到 95.76%。实验验证了相干合成效率极易受激光

腔长差的影响，不同腔长差下相干合成效率差异可达 18% 以上，且存在最佳腔长差；抽运对称性对相干合成效率的影响不大，在 2% 以内。实验中没有明显非线性现象产生，基于此实验装置，采用更高功率的抽运源，有望获得百瓦级高功率相干合成激光输出。

- [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] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C 1997 *Opt. Lett.* **22** 907

- [3] Liu L, Vorontsov M A 2005 *Proc. SPIE* **5895** 58950P-1
 [4] Shay T M, Benham V 2004 *Proc. SPIE* **5550** 313
 [5] Lhermite J, Suran E, Kermen V, Louradour F, Desfarges-

- Berthelemot A, Barthelemy A 2010 *Opt. Express* **18** 4783
- [6] Aurou S, Kermene V, Desfarges-Berthelemot A, Barthelemy A 2009 *Opt. Express* **17** 17694
- [7] Lei B, Wang L, Feng Y 2011 *High Power and Laser Beams* **19** 2007 (in Chinese) [雷兵, 王玲, 冯莹 2011 强激光与粒子束 **19** 2007]
- [8] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges-Berthelemot A, Lefort L, Barthelemy A, Even P, Pureur D 2003 *Opt. Express* **11** 87
- [9] Morel J, Woodtli A, Dandliker R 1993 *Opt. Lett.* **18** 1520
- [10] Corcoran C J, Durville F 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 201118
- [11] 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]
- [12] Peng Q J, Sun Z, Chen Y, Guo L, Bo Y, Yang X, Xu Z 2005 *Opt. Lett.* **30** 1485
- [13] Kozlov V A, Hernandez-Cordero J, Morse T F 1999 *Opt. Lett.* **24** 1814
- [14] Shirakawa A, Saitou T, Ueda K 2002 *Opt. Express* **10** 1667
- [15] Saboury D, Desfarges-Berthelemot A, Kermene V, Barthelemy A 2004 *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **10** 1033
- [16] Fridman M, Eckhouse V, Davidson N, Friesem A A 2007 *Opt. Lett.* **32** 790
- [17] Wang B S, Mies E, Minden M, Sanchez A 2010 *Opt. Lett.* **34** 863
- [18] Peng Q J, Cui D F, Xu Z Y 2006 *SPIE* **6344** 63441Y-1
- [19] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in Chinese) [王建明, 段开棕, 王屹山 2008 物理学报 **57** 5627]
- [20] Liu Y, Cheng Y, Xu L X, Zheng R, Wang X B, Wang H S, Lu C Y, Sun B 2008 *Acta Phys. Sin.* **58** 3929 (in Chinese) [刘洋, 程勇, 许立新, 郑睿, 王小兵, 王会升, 卢常勇, 孙斌 2008 物理学报 **58** 3929]
- [21] Jia X J, Liu F N, Fu S G, Zhang J, Liu Y G, Guo Z C, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2007 *Opt. Lett.* **3** 107
- [22] Lei B, Feng Y, Liu Z J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6419 (in Chinese) [雷兵, 冯莹, 刘泽金 2008 物理学报 **57** 6419]
- [23] Taylor L R, Feng Y, Calia D B 2010 *Opt. Express* **18** 8540
- [24] Bloom G, Larat C, Lallier E, Carras M, Marcadet X 2010 *Opt. Lett.* **35** 1917

Coherent beam combination of two high power double clad fiber lasers by using an all-fiber Michelson cavity

Zhu Ya-Dong Xiao Hu Wang Xiao-Lin Ma Yan-Xing Zhou Pu[†]

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

(Received 21 April 2011; revised manuscript received 27 May 2011)

Abstract

Michelson cavity technique provides an effective solution for coherent beam combination. In this paper, coherent beam combination of two fiber lasers by using an all-fiber Michelson cavity technique is demonstrated, and 11.75 W coherent output power with a coherent combination efficiency of 95.76% is obtained. The influences of the relation of coherent combination efficiency to laser cavity length difference, and the pump symmetry on coherent combination efficiency are studied experimentally. Experimental results show that the coherent combination efficiency is highly sensitive to the influence of laser cavity length difference, that the difference in combination efficiency, induced by laser cavity length difference, can be as large as 18%, and that there is an optimal cavity length difference. The maximal influence of pump symmetry on coherent combination efficiency is within 2%, which can be neglected.

Keywords: fiber laser, coherent combing, all-fiber, Michelson cavity

PACS: 42.55.Wd, 42.27.De

[†] E-mail: zhoup203@163.com