

全光纤激光相干合成实验研究

沈洪斌¹, 何海军², 侯 静³

(1. 解放军军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003; 2. 解放军 66336 部队, 河北 保定 074000;
3. 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 设计了由两支光纤激光器组成的迈克尔逊型全光纤激光器阵列。通过实验, 分析输出光束的耦合相干性, 分析两泵浦激光器泵浦功率比对耦合效率、泵浦效率及输出功率的影响, 分析所设计的光纤激光器阵列的稳定性。结果表明: 激光器阵列的输出功率等于两光纤激光器输出功率的相干合成, 耦合效率相对稳定; 未达到增益饱和的情况下, 泵浦效率和输出功率均与泵浦功率比成递减关系。

关键词: 全光纤激光; 相干合成; 稳定性; 耦合效率

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Experimental Research on All-fiber Coherent Beam Combining

SHEN Hong-bin¹, HE Hai-jun², HOU Jing³

(1. Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
2. Unit 66336, Baoding 074000, China; 3. College of Optoelectric Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The Michelson type all-fiber laser array composed by two fiber lasers was designed. By experiment, the character of coupling interference of output beam was analyzed. The relation between the ratio of the two pumping power and the coupling efficiency, the pumping efficiency, the output power, and the stability of this system was analyzed. Experimental analysis results showed that the output power of fiber laser array was equal to the interference power of the two beams from the two embranchment lasers, and the coupling efficiency was correspondingly steady; and the pumping efficiency and the output power reduced as the ratio of pumping power increased without reaching plus saturation.

Key words: all-fiber laser; coherent combination; stability; coupling efficiency

1 引 言

光纤激光器是当今光电子技术领域中最前沿的研究课题之一, 作为一种新型激光器件, 它具有转换效率高、激光阈值低、可调谐范围宽、光束质量好等优点, 并且散热面积大、体积小、寿命长, 同常规的体积庞大的气体激光器和固体激光器相比, 有显著优势, 已成为激光在民用和军事应用中的重要候选者^[1]。近年来, 国际上发展的以双包层光纤为基础的包层泵浦技术, 为提高光纤激光器的输出功率提供了新的途径, 改变了光纤激光器只是一种小功率激光器件的历史。有关报道表明^[2-5], 半导体激光

器泵浦的光纤激光器技术已经成熟, 其单根的输出功率可达到千瓦量级。然而由于受到掺杂光纤的非线性效应、光学损伤及热损伤等物理机制的限制, 要更大幅度地提高单个激光器的功率相当困难。为达到高的激光输出功率和近衍射极限的光束质量, 可采用的技术途径是利用光纤激光器阵列, 对输出激光束进行相干合成。光纤激光器的相干合成作为一个非常活跃的研究领域, 正日益引起国内外研究人

作者简介: 沈洪斌(1980-), 男, 助教, 硕士, 研究方向为激光技术与自适应光学。E-mail: shenghongbin11@sina.com

收稿日期: 2007-12-29

员的关注,并开展了一些理论和实验研究工作^[6-9]。光纤激光器相干合成的其中一个重要方案是全光纤激光相干合成,它是用光纤耦合器将不同光纤激光器的输出耦合到一根光纤输出的全光纤结构。2002年和2003年,国外有关杂志曾先后报道了迈克尔逊(Machelson)腔型和马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)腔型激光相干合成全光纤结构^[10-11],其结构新颖,是一种较容易实现激光器阵列相干耦合输出的结构。在全光纤激光相干合成方面,国内处于起步阶段,南开大学做了一部分工作^[12-13]。本文设计了由两支光纤激光器组成的迈克尔逊腔型全光纤激光器阵列,对输出光束的耦合相干性和稳定性进行了研究,并深入分析了两泵浦激光器泵浦功率比对耦合效率、泵浦效率及输出功率的影响。

2 迈克尔逊腔型全光纤激光器阵列的设计

迈克尔逊腔型全光纤激光器阵列结构如图1所示,整个装置围绕分光比为50:50的耦合器(C)构建,耦合器的输入端连接两支由波长980nm的半导体激光器(LD)泵浦的分布布拉格光栅(FBG)反射光纤激光器,泵浦光通过波分复用器(WDM)对3m长的掺铒光纤进行泵浦,耦合器输出端A处理成反射率为3.4%的端面作为腔镜反射器,输出端B研磨成斜面以避免光反馈,两布拉格光栅和输出端A组成了迈克尔逊干涉谐振腔,腔内光波场在耦合器发生干涉,输出端A输出1550nm的激光。

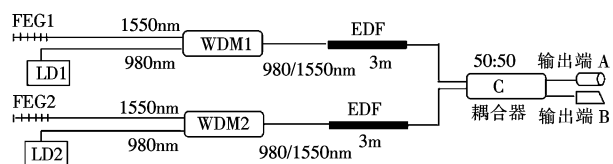


图1 迈克尔逊腔型全光纤激光器阵列结构

3 实验结果和分析

3.1 输出光束的相干性研究

实验中测量了单个光纤激光器工作时对应的A端输出功率,结果如图2、图3所示。

图2中,纵坐标 P_{A1} 表示LD1单独工作时耦合器输出端口A的功率值,横坐标 I_1 表示LD1的驱动电流,从图中可以看出,光纤激光器的泵浦阈值约为LD驱动电流等于60mA时的功率,测得这时LD输出功率约为20mW。图3为LD2单独工作时端口A功率与驱动电流的关系。两图中 P_{A1} , P_{A2} 有一定差异,是由于光纤焊接差异造成两子光纤激光器的损耗不一样所致。图4给出了LD1驱动电流为60mA时端口A输出的光谱图,可见端口A输出1550nm的激光。

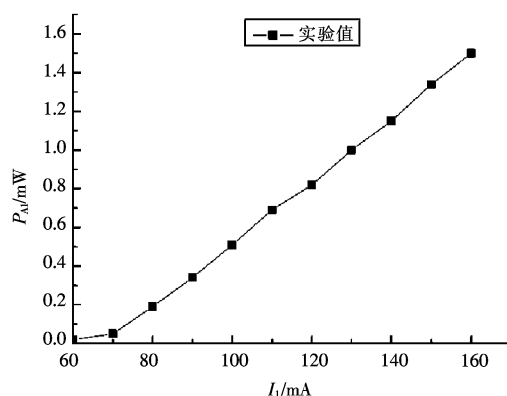


图2 端口A输出功率与LD1驱动电流的关系

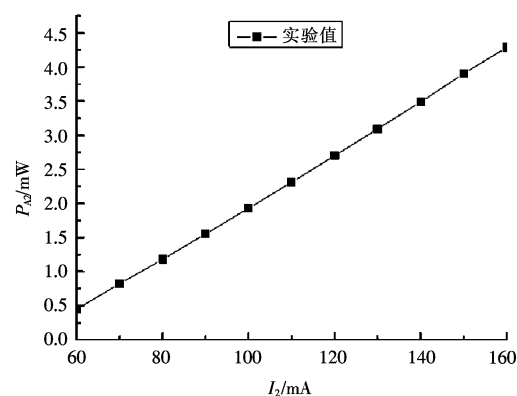


图3 端口A输出功率与LD2驱动电流的关系

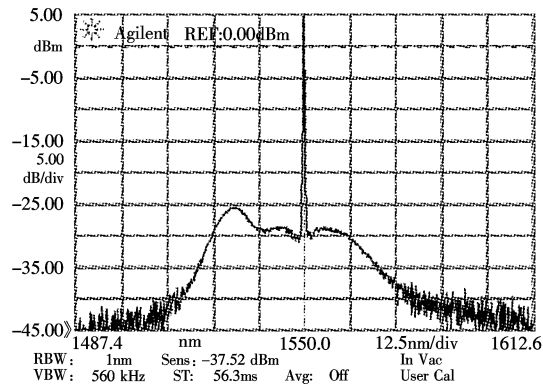


图4 LD1驱动电流为60mA时端口A输出的光谱图

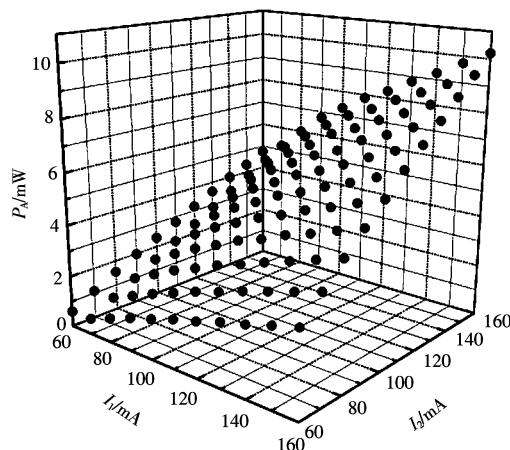


图5 两LD同时工作时的输出功率

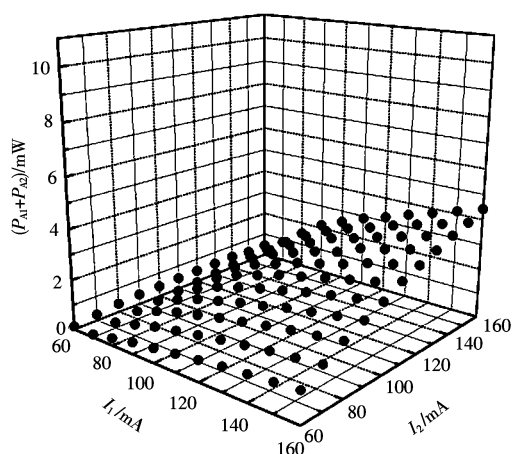


图6 两 LD 单独工作时的输出功率之和

实验测量了两子光纤激光器同时工作时的耦合输出功率,结果如图5。纵坐标 P_A 为两 LD 同时工作时的端口 A 输出功率,横坐标为两 LD 的驱动电流,很明显,随着两驱动电流的增大,输出功率增大。为了研究输出光束的耦合相干性,把图2、图3的实验值相加,结果如图6所示,可看作两子激光器非相干叠加的结果。对比图5和图6数据可知:泵浦激光器单独工作时的独立输出功率之和小于两泵浦激光器同时工作在对应驱动电流时的输出功率,后者约为前者的2倍多(与文献[11]结论一致),这说明耦合器端口 A 输出光束为两子光纤激光器输出光束的相干合成。为了研究输出光束的相干度,考虑相干公式:

$$P_A = P_{A1} + P_{A2} + 2\gamma \sqrt{P_{A1}P_{A2}} \quad (1)$$

式中, γ 为相干因数;当 $\gamma = 1$ 时,表示完全相干。把图2、图3和图5的测量数据代入式(1),可求得对应的 γ 值,结果如图7所示。相干因数 γ 在 0.843 ~ 0.925 范围内,且随着泵浦功率的增大,相干因数趋于稳定。相干因数小于 1,这可能有两个原因:①在输出端口存在未滤掉的 980nm 的泵浦激光的影响。因为实验中未采用隔离器隔离波长为 980nm 的泵浦光,所以在输出端会存在一定比例的波长为 980nm 的泵浦激光。这使得输出光束相干度下降。②组成耦合式光纤激光器阵列的两支光纤激光器的输出光束之间的相位并非完全同步,即相位差不等于 0,处于不完全相干。假设当 $\gamma = 1$ 时,完全相干合成功率 P'_A ,则 P'_A 与实际测量值之间的偏差百分比 $\eta = (P'_A - P_A)/P'_A$,通过计算, η 在 4% ~ 14% 范围内。

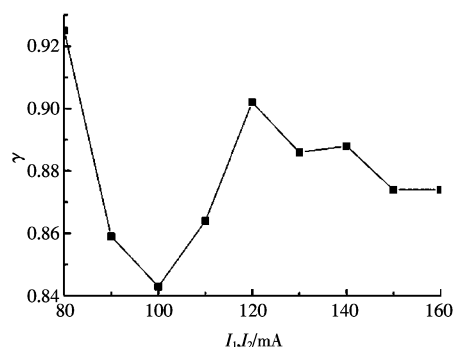


图7 LD 不同驱动电流下的激光相干合成的相干因数

3.2 相干合成稳定性研究

定义耦合输出效率 η_c : 输出端 A 的总输出功率 P_A 与各泵浦激光器单独工作时在输出端 A 的输出功率 P_{Ai} ($i=1,2$) 总和之比,即 $\eta_c = P_A / \sum P_{Ai}$ 。定义两泵浦激光器功率比 $K = P_1/P_2$,其中 P_1, P_2 分别为 LD1, LD2 的输出功率。实验中测量计算了 η_c 和 K 的关系,结果如图8,可知:①当 I_1 较小时,随着 K 增大, η_c 明显增大,即 LD1 泵浦功率较小时,随着 LD2 泵浦功率的减小,耦合输出功率增大;②当 I_1 较大时,随着 K 增大, η_c 变化不明显,说明 LD1 泵浦功率较大时,耦合输出效率不随着泵浦功率比而变,趋于稳定。鉴于 LD1, LD2 的对称性,可推论当两子光纤激光器其中一个泵浦功率较大时,该相干合成系统是稳定的。

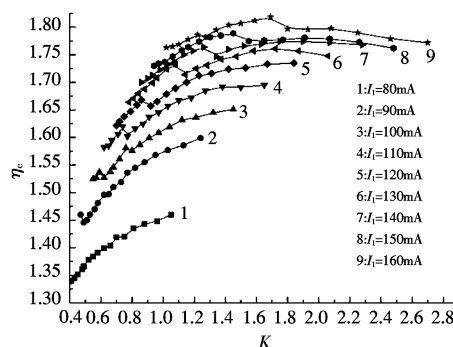


图8 耦合输出效率与泵浦功率比的关系

图9还给出了3.1定义的理论值与实验值的偏差百分比 η 与 K 的关系,可知: η 在 4% ~ 14% 范围内。当 LD1 驱动电流 I_1 较小且不变时, η 随着 K 增大而增大,即随着 P_2 的增大而减小,而当 I_1 较大且不变时, η 的变化趋于平缓,即偏差百分比相对稳定。这说明相干合成输出相对稳定。

3.3 系统泵浦效率和输出功率研究

定义总泵浦效率 η_p : 输出端 A 总输出功率 P_A 与各泵浦激光器的泵浦功率 P_i ($i=1,2$) 总和之比,即 $\eta_p = P_A / \sum P_i$ 。图10给出了 η_p 与 K 的关系。

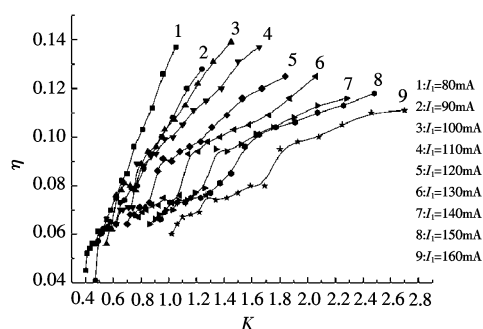


图9 相干合成偏差百分比与泵浦功率比的关系

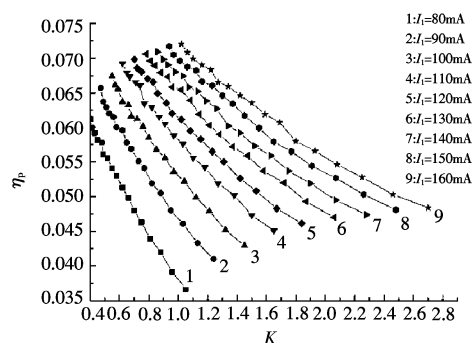


图10 总泵浦效率与泵浦功率比的关系

由图10可知:在未达到增益饱和的情况下,总泵浦效率在3.5%~7.5%范围内。当LD1驱动电流 I_1 不变时, η_p 随着 K 的增大而减小,即随着泵浦功率 P_2 的增大而增大,且在 I_1 较小时,总泵浦效率基本上与泵浦功率比值 K 成线性关系;当 I_1 增大时, η_p 增大,说明泵浦功率增大时,总泵浦效率增大。

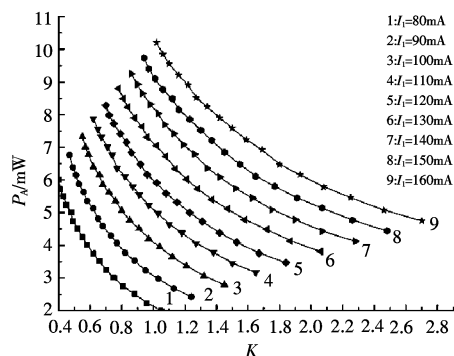


图11 总输出功率与泵浦功率比的关系

图11给出了总输出功率 P_A 与泵浦功率比的关系,从图中可看出,本实验设计的相干合成系统输出功率最大达到10.5mW。从图中还可以得到结论:未达到饱和增益的情况下,当 I_1 不变时,总输出功率与泵浦功率比成递减关系,且变化是非线性的,这是由于式(1)中相干项的影响决定的。

4 结论

实现了全光纤激光的相干合成输出,相干因数在0.89左右,实测相干合成功率与理论值偏差在

4%~14%范围内。实验研究了耦合输出效率,结果表明该相干合成输出是相对稳定的。研究了泵浦效率和总输出功率的影响因素,泵浦功率越大,泵浦效率越大,总输出效率越大。该系统泵浦效率在3.5%~7.5%范围内,输出功率最大达到10.5mW。全光纤激光器阵列易于完成相干合成,结构简单,耦合效率较高,输出较稳定,是一种理想的实现相干耦合的结构方案,通过耦合更多的子光纤激光器有可能实现高功率的激光输出。

参考文献:

- [1] 胥杰,赵尚弘,张磊,等. 机载软杀伤光源光纤激光组束方法的选择[J]. 激光与红外, 2007, 37(3): 208-210.
- [2] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power[J]. Opt. Exp., 2004, 12(25): 6088-6092.
- [3] Gapontsev V, Gapontsev D, Platonov N, et al. 2kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005: 508.
- [4] 刘颂豪. 光纤激光器的新进展[J]. 光电子技术与信息, 2003, 16(1): 1-8.
- [5] 赵鸿,周寿桓,朱辰,等. 大功率光纤激光器输出功率超过1.2kW[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 930.
- [6] Hou J, Xiao R. Coherent beam combination of two polarization maintaining ytterbium fibre amplifiers[J]. Chinese Physics Letter, 2005, 22(9): 2273-2275.
- [7] Morel J. Coherent coupling of an array of Nd³⁺ doped single-mode fiber lasers using an intracavity phase grating[C]//Proc of SPIE. 1992, 1789: 13-17.
- [8] Fan T Y. Laser beam combining for power and brightness scaling[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2000, 3: 49-54.
- [9] Agust S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2004, 29: 474-476.
- [10] Shirakawa A, Saitou T, Sekiguchi T, et al. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. Opt. Exp., 2002, 21: 1167-1172.
- [11] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges-Berthelelot A, et al. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers[J]. Opt. Exp., 2003, 11: 87-97.
- [12] 赵帅,范万德,盛秋琴. 光纤激光器相干组束技术研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 920-924.
- [13] S Chen, Y Li, K Lu. Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers[J]. Opt. Exp., 2005, 13(20): 7878-7883.