

文章编号: 0258-7025(2009)06-1437-05

基于偏振锁相的双光束相干合成

卢常勇¹ 刘旭¹ 刘洋¹ 李莉² 王小兵¹ 万强¹ 郭延龙¹ 韦尚方¹

(¹武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075)

(²武汉军械士官学校光学教研室, 湖北 武汉 430075)

摘要 多路光束的相干合成是获得高功率、高亮度激光输出的有效途径。实验采用一种新型的偏振锁相技术, 实现了对偏振方向相互垂直的两路光束的相位锁定和相干合成。研究表明该偏振锁相装置可将两束光的相位差锁定于 $0 \sim 2\pi$ 之间的任意值且在较大振幅比情况下仍可获得大于 90% 的合束效率, 是一种可定标放大的相干合成技术。

关键词 激光技术; 相干合成; 锁相

中图分类号 TN248.1; O436.3; TN911.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1437

Coherent Combining of Two Beams Based on Polarization Phase Locking

Lu Changyong¹ Liu Xu¹ Liu Yang¹ Li Li² Wang Xiaobing¹ Wan Qiang¹
Guo Yanlong¹ Wei Shangfang¹

(¹Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075 China)
(²Staff Room of Optics, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075 China)

Abstract Coherent combining of laser arrays is an important technique in realizing high power high brightness laser system. The coherent combining of two orthogonal polarized lasers is achieved by using polarization phase locking technique. Experimental results show that this scheme can achieve above 90% combining efficiency even when the power of the two lasers is highly imbalanced. The combining method can be scaled to a large number of lasers.

Key words laser technique; coherent combining; phase-locked

1 引言

多路光束的相干合成技术是获得高功率、高亮度激光输出的有效途径。其中, 对各路光束进行相位锁定是实现相干合成的关键技术之一, 直接影响合成光的远场亮度。相位锁定技术可分为主动相位锁定和被动相位锁定: 主动相位锁定是通过反馈系统和相位控制元件实现对各光束的相位实时控制, 常用于采用 MOPA 结构的相干合成^[1~3], 美国 Northrop Grumman 航空技术研究所采用该技术已实现输出功率达 19 kW, $M^2 < 2$ 的连续激光输出, 该技术是短期内实现 100 kW 级功率输出的首选方案; 被动相位锁定则是多个激光器通过某种方式组成一个自适应系统, 当系统稳定工作时, 各个激光器的波长和相位被自动锁定, 是一种很有前途的相干

合成途径。常采用的技术有泰柏效应^[4]、自成像谐振腔^[5~7]、光纤自组织^[8,9]、光纤耦合器^[10]、傅里叶透镜腔^[11]、腔内干涉合束^[12]等。光纤自组织法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; 光纤耦合器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; 泰柏效应和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^[13]; 腔内干涉合束法则对各光束在干涉合束器上的振幅比有严格要

收稿日期: 2008-07-04; 收到修改稿日期: 2008-10-16

作者简介: 卢常勇(1979-), 男, 主要从事全固态激光器件的研究与设计方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net

求,当振幅比偏离干涉合束器设计值时,合束效率明显下降。

本文采用一种新型的被动相位锁定技术,在激光二极管抽运的 Nd:YAG 固体激光器上实现了对偏振方向相互垂直的两路光束的相位锁定和相干合成输出。其原理与腔内干涉合束器类似,所不同的是只有这两束偏振方向相互垂直的光束相位差恒定时,其合成光束的偏振态才可无损耗地通过偏振锁相器,从而在腔内形成振荡。同时,该方法还可将任意振幅比的两束光的相位差锁定于 $0 \sim 2\pi$ 之间的任意值。实验表明,该技术是一种可以定标放大的被动锁相结构,是实现多路光束相干合成的有效途径之一。

2 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示。

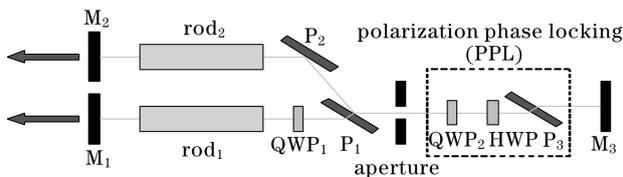


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

支路 1(P 支路)由平面输出镜 M_1 ($T=70\%$)、增益介质 Rod_1 、 $\lambda/4$ 波片 1(QWP_1)、偏振片 P_1 和平面全反镜 M_3 构成,腔长为 350 mm,支路 2(S 支路)由平面输出镜 M_2 ($T=70\%$)、增益介质 Rod_2 、偏振片 P_2 、偏振片 P_1 和平面全反镜 M_3 构成,腔长为 375 mm。其中, QWP_1 用于调整 P 支路的输出能量以便实验所需,设计时两支路腔长的选择应保证有相同频率的纵模,对于增益带宽约为 120 GHz 的 Nd:YAG 介质,通过理论计算得出实验条件下可以在两支路内共同起振的纵模数约有 20 个左右;两支路的增益介质均为 Nd:YAG 激光棒,晶体尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为 1%,两端镀 1064 nm 增透膜,侧面打毛,采用功率相同的 808 nm 脉冲激光二极管侧面抽运,重复频率为 1 Hz,两抽运模块采用串联工作方式,由同一驱动源驱动以实现同步;孔径为 1 mm 的小孔置于两支路的公共部分,使两支路均工作于基横模;偏振锁相装置由置于两支路公共部分的 $\lambda/4$ 波片 2(QWP_2), $\lambda/2$ 波片(HWP)和偏振片 P_3 (与 P_1 同方向)组成。

该系统的锁相原理如下:当腔内无偏振锁相装

置时,P 支路内振荡光束的偏振态为 P 光,S 支路内为 S 光,由于二者无固定的相位关系及偏振方向相互垂直,故无法合成为具有新的偏振态的一束光,因此,二者均独自振荡输出,互无关系。当腔内插入偏振锁相装置时,若在 P_1 处相遇的 P 光和 S 光存在恒定的相位差,则通常情况下合成为一束椭圆偏振光,该椭圆偏振光通过 QWP_2 和 HWP 的作用后可形成一束偏振方向为水平方向的 P 光,因此可以无任何损耗地通过 P_3 形成激光振荡,即只有当 P 支路和 S 支路的相位差恒定时,二者才可合成为一束具有新的偏振态的光,并在偏振锁相器(QWP_2 和 HWP)的控制下无损耗地通过 P_3 形成激光振荡,达到锁相的目的;反之,若二者相位差不恒定,由于偏振锁相装置的存在,P 支路的 P 光和 S 支路的 S 光在 P_3 处均经历相当大的损耗,因此二者均无法实现激光振荡。二者的相位差由偏振锁相器,即 QWP_2 和 HWP 的慢轴位置决定,故通过恰当旋转二者的慢轴可将该相位差锁定于 $0 \sim 2\pi$ 之间的任意值。同时,该系统对于两支路的功率比并无要求,相同相位差而不同振幅比的 P 光和 S 光合成后只是主轴方向发生变化,仍可通过旋转 QWP_2 和 HWP 慢轴的位置达到锁相的目的。

实验中,为了方便起见,研究了将相位差锁定于 0° (in phase)和 180° (antiphase)的情况,此时两支路合成的光束为线偏振光,该线偏振光的振动方向与水平方向(P 光)的夹角 θ 由支路 2 和 1 的振幅比 $\frac{A_2}{A_1}$ (功率比)决定。

相位差为 0° 时

$$\theta = \arctan \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}. \quad (1)$$

相位差为 180° 时

$$\theta = \pi - \arctan \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}. \quad (2)$$

在以上两种情况下可以去掉偏振锁相器内的 QWP_2 ,只需旋转 HWP 的慢轴位置相对于水平方向的夹角 θ_{HWP} 即可使合成光无损耗地通过 P_3 ,实现两支路的相位锁定

$$\theta_{\text{HWP}} = \frac{\theta + n\pi}{2} \quad n = (0, 1). \quad (3)$$

3 实验结果及分析

实验首先研究了将两支路的相位差锁定于 0° 情况下的合束效率随抽运电流的关系,采用

EPM1000 型激光功率/能量计分别监测两支路独立振荡时的能量输出之和及锁相后的能量输出之和,二者的比值即为合束效率。具体测量方法是:将 HWP 的慢轴旋转至水平方向时,S 支路的光束无法通过 P_3 ,因此无法起振,而 P 支路的光束可以无损耗地通过 P_3 ,此时输出能量即为 P 支路的能量;而将 HWP 的慢轴旋转与水平方向成 45° 夹角时,P 支路的光束无法通过 P_3 ,因此无法起振,而 S

支路的光束可以无损耗地通过 P_3 ,此时输出能量即为 S 支路的能量,二者之和即为锁相前的能量。根据(1)式和(3)式,当两支路的振幅比为 1 及相位差为 0° 时合成后的偏振方向与水平方向的夹角 θ 应为 45° ,相位锁定时 HWP 的慢轴与水平方向的夹角为 22.5° 或 112.5° ,将 HWP 旋转至 22.5° 后两支路的输出能量之和即为锁相合束后的能量,测量结果如图 2 所示。

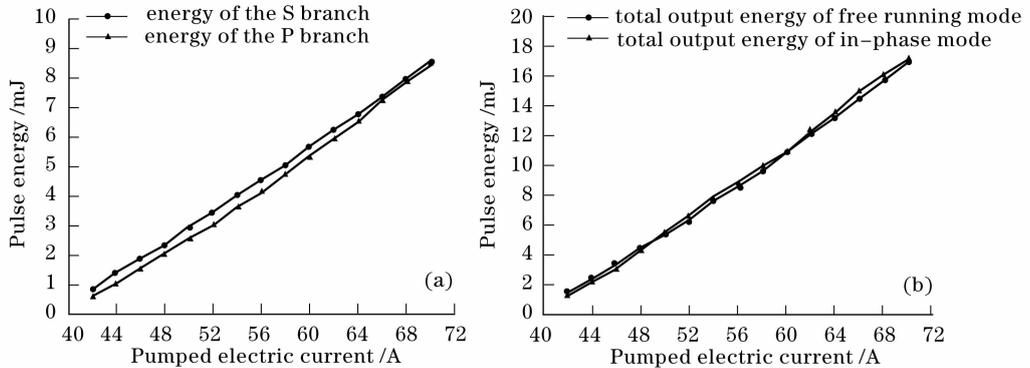


图 2 两支路独立振荡的输出能量(a)及锁相前后的两支路输出能量之和(b)随抽运电流的关系

Fig. 2 Output power of the individual channel(a) and the total output power of free running and in-phase modes (b) versus the pumped electric current

图 2(a)中的两条曲线分别是 P 光和 S 光独立振荡的输出能量随抽运电流的关系,图 2(b)是锁相前后的两支路输出能量之和随抽运电流的关系。可以看出,锁相后的输出能量与锁相前基本一致,合束效率始终保持在 100%,个别点的合束效率超过 100%有可能是测量误差所致;低抽运条件下(42A, 44A, 46A)的合束效率略低($\sim 95\%$)的主要原因是此时两支路均处于阈值附近且振幅比大于 1.2(见图 2(a)),对应的 θ_{HWP} 偏离 22.5° 所致。而随着抽运功率的增加,两支路输出能量趋于一致,对应的 θ_{HWP} 接近实验预设的 22.5° ,因此,合束效率提高到 100%。

实验发现,当两支路相位锁定时,用黑相纸挡住任何一支路系统均无激光输出,排除了两支路独立振荡的可能性,表明该偏振锁相装置确实成功实现了两路偏振方向相互垂直光束的相位锁定;同时,将小孔从公共部分取出后置于任何一支路,发现应工作于多横模状态的无小孔支路也自动工作于基横模状态,近场输出光斑也为 1 mm 左右,进一步验证了两支路的相干合成。

为了研究在两支路相位差锁定于 0° 情况下不同振幅比时的合束效率,在抽运电流 70 A 条件下,将 QWP_1 插入 P 支路并通过旋转其慢轴位置即可

改变该支路的输出能量,而此时 S 支路的输出能量保持不变从而实现两支路的不同振幅比目的。实验测量了在 5 种振幅比(1, 2, 3, 4, 5)条件下分别将 HWP 的慢轴固定于 22.5° 和根据(1)式和(3)式优化后的角度两种情况下的合束效率,测量结果如图 3 所示。

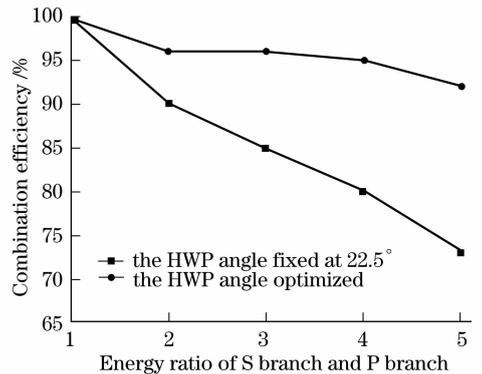


图 3 两支路不同振幅比下的合束效率

Fig. 3 Combining efficiency for various power ratios of S channel to P channel

从图 3 可以看出通过优化 HWP 的慢轴角度,两支路的振幅比在小于 4 以前均保持在 95% 以上,只有振幅比为 5 时合束效率才降为 92%,表明通过优化设计该偏振锁相装置能够对偏振方向相互垂

直、任意振幅比的两束光实现相位锁定,与理论预期相符。而将 HWP 的慢轴角度固定于 22.5° 时,振幅比从 1 变化到 5 时,合束效率由 100% 降至 73%,这主要是由于 HWP 的慢轴角度越来越偏离对应的 θ_{HWP} 引起腔内损耗增加所致。

为了进一步研究相干合成对远场强度的影响,实验采用 Spiricon 公司的 SCOR20 CCD 相机分别拍摄了两支路独立振荡、两支路同时输出时锁相前和锁相后 4 种情况下的光束远场分布。测量时:1) 保持抽运电流不变(均为 70 A);2) 在 S 支路输出端插入一个 $\lambda/2$ 波片以实现两支路的输出偏振方向平行;3) 保持相同的衰减量以便在同等条件下比较锁相前后的远场强度。测量结果如图 4 和图 5 所示。

图 4(a),(b) 分别为两支路独立输出时的远场分布,二者的远场强度基本相同。图 5(a) 为两支路相位未锁定(腔内无偏振锁相装置)时两支路非相干合成的远场分布,由于两支路相位差是随机的,因此其远场强度仅仅是两支路独自输出的线性叠加,受到实验条件所限,两支路的输出中心距离约为 25 mm,光束直径约为 1 mm,占空比较小导致合成远场强度变小,未达到非相干合成理想情况下单个支路的 2 倍,约为一个支路的 1.65 倍。图 5(b) 为将偏振锁相装置插入谐振腔且 θ_{HWP} 的慢轴旋转至 22.5° 后的远场分布,此时远场出现了强度对比明显的干涉条纹且强度明显提高,约为非相干合成的 1.87 倍,说明该偏振锁相装置实现了对偏振方向相互垂直的两束光的相位锁定和相干合成,但同样受到占空比等因素的限制,导致条纹间距偏小且强度未达到两支路相干合成理想情况下单个支路的 4 倍,约为一个支路的 3 倍。

4 多路固体激光器的相位锁定和相干合成

采用的偏振锁相技术通过控制腔内的偏振损耗实现了两光束的被动相位锁定,避免了 MOPA 结构中相对复杂的主动相位锁定系统,相较于其他被动相位锁定技术,具有结构简单、合束效率高和可以定标放大等优点,特别适合于多路固体激光器的相干合成。图 6 为采用该技术实现多路光束相干合成的一种可行方案,将实验中的两路光束相位锁定后合成一束光,作为下一步锁相的一个支路,以此类推,最终实现所有光束的相位锁定。该方案的特点是合

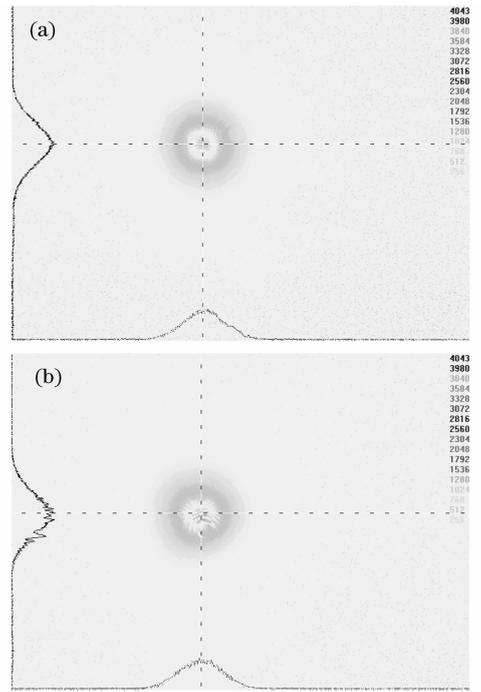


图 4 两支路独自振荡的远场光斑。(a)P 支路;(b)S 支路
Fig. 4 Far-field intensity profiles of individual channel.

(a) P channel; (b) S channel

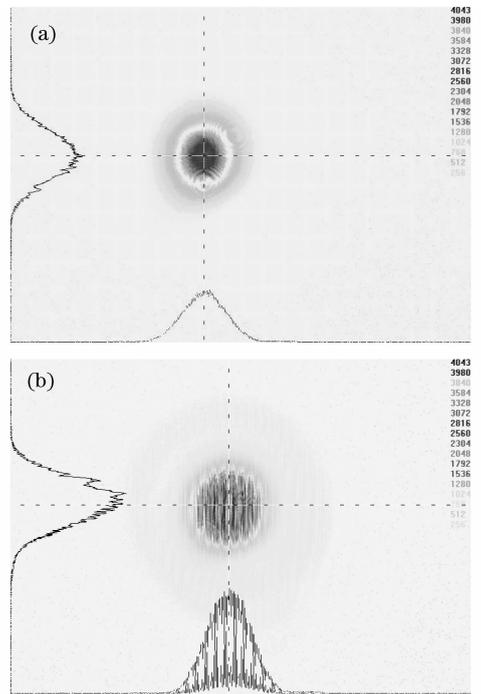


图 5 两支路同时输出的远场光斑。(a)独立运行;
(b)相位锁定

束时两支路的振幅均相同,合束效率高,设计时保证在所有支路中必须有 1 个以上的相同纵模频率,这点通过采用一些辅助措施完全可以实现。

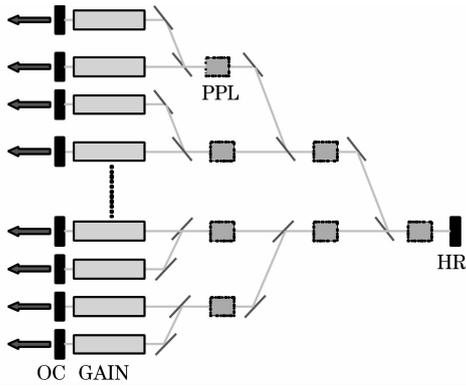


图 6 基于偏振锁相的多路固体激光相干合成装置

Fig. 6 Configurations of coherent polarization locking for multi-channel laser

5 结 论

采用了一种新型的基于偏振锁相的相干合成技术,并通过实验在激光二极管抽运的 Nd:YAG 固体激光器上实现了对偏振方向相互垂直的两路光束的相位锁定和相干合成输出,当两光束的振幅相同时合束效率为 100%,振幅比为 5 时合束效率仍大于 90%,原理上通过对偏振锁相器的调节,可以将偏振方向相互垂直、任意振幅比的两束光的相位差锁定于 $0 \sim 2\pi$ 的任意值。锁相后两光束的远场光斑具有高对比度的干涉条纹且强度明显高于锁相前。研究结果表明,该技术是一种可以定标放大的被动锁相结构,是实现多路光束相干合成的有效途径之一。下一步将研究该技术用于连续、多路的固体激光器相干合成领域。

参 考 文 献

1 J. Anderegg, S. J. Brosnan, M. E. Weber *et al.*. 8-watt coherently phased 4-element fiber array [C]. *SPIE*, 2003, **4974**: 1~6

2 M. Wickham, J. Anderegg, S. J. Brosnan *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U

3 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6464~6469
肖 瑞, 侯 静, 姜宗福等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6464~6469

4 M. Wragge, P. Glas, M. Leitner. Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structured mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13): 980~982

5 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113 W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 412~414

6 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726

7 Qianjin Tang, Yongai Yu, Qiquan Hu *et al.*. Phase locking of two beams emitting from a side pumped Nd:YAG slab with self-imaging resonator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 34~36

8 Qinjun Peng, Zhipei Sun, Yahui Chen *et al.*. Efficient improvement of laser beam quality by coherent combining in an improved Michelson cavity [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12): 1485~1487

9 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1200~1202

10 Akira Shirakawa, Tomoharu Saitou, Tomoki Sekiguchi *et al.*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(21): 1167~1172

11 C. J. Corcoran, K. A. Pasch. Self-Fourier functions and coherent laser combination [J]. *J. Phys. A: Mathematical and General.*, 2004, **37**: L461~L469

12 Amiel A. Ishaaya, Liran Shimshi, Nir Davidson *et al.*. Coherent addition of spatially incoherent light beams [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20): 4929~4934

13 Chen Zilun, Hou Jing, Zhou Pu *et al.*. Mutual injection locking of two individual fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7046~7050
陈子伦, 侯 静, 周 朴等. 两个光纤激光器的互相注入锁定 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 7046~7050