

文章编号 1004-924X(2011)08-1757-06

## 两路脉冲固体激光器的相干合成

卢常勇<sup>1\*</sup>, 李莉<sup>2</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 朱孟真<sup>1</sup>, 米朝伟<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 黎伟<sup>1</sup>, 张广远<sup>1</sup>

(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:**提出了采用迈克尔逊干涉复合腔技术进行两路固体激光器相干合成的实验方案。该方案利用双光束干涉时的相干相长和相干相消特性,结合谐振腔自身的增益损耗原理来实现两激光器的被动式相干合成。理论分析了该技术的锁相机理,并在实验中实现了两路脉冲固体激光器的相位锁定,获得了单脉冲能量 300 mJ 的相干合成激光输出,合束效率约为 80%。实验表明,采用提出的复合腔技术实现相干合成具有自选择和自调整的特点,且结构简单、合束效率高,很好地解决了多路激光相干合成时遇到的占空比问题,可以实现多路固体激光器的相干合成。

**关键词:**相干合成;迈氏腔;脉冲固体激光器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1757

## Coherent combining of two pulsed solid state lasers

LU Chang-yong<sup>1\*</sup>, LI Li<sup>2</sup>, LIU Xu<sup>1</sup>, ZHU Meng-zhen<sup>1</sup>, MI Chao-wei<sup>1</sup>,  
LIU Yang<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Guang-yuan<sup>1</sup>

(1. *Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned  
Officer Academy, Wuhan 430075 China;*

2. *Staff Room of Optics, Wuhan Ordnance Non-Commissioned  
Officer Academy, Wuhan 430075, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: lu\_changyong@126.com*

**Abstract:** A coherent combining scheme for two solid state lasers was proposed by using Michelson cavity technique. Based on constructive interference and destructive interference properties of two beam interferences, this scheme implemented the passive coherent combination of two lasers in consideration of the gain loss of a cavity. The phase-locking principle was analyzed in detail and the phase-lockings of two individual pulsed solid state lasers were experimentally demonstrated. Finally, the coherent combination output energy of 300 mJ/pulse was obtained, and its combination efficiency was 80%. These results show that the coherent combining technique proposed in this paper is characterized by self-choosing and self-adjusting and can offer a high combination efficiency. The technique can also be used in multi-beam solid laser coherence combination, for it solves the problem on the duty ra-

tio in coherent combination.

**Key words:** coherent combining; Michelson cavity; pulsed solid state laser

## 1 引言

采用多光束相干合成技术是获得高平均功率和高光束质量激光输出的有效途径。目前,美国 Northrop Grumman 公司采用基于主振荡功率放大(MOPA)结构的七路固体激光主动相位控制相干合成技术已获得了 105.5 kW 的连续波激光输出<sup>[1]</sup>,而国内的相干合成技术研究主要集中在光纤激光器领域,亦已经取得了较高功率的激光输出<sup>[2-5]</sup>,但针对固体激光相干合成技术的研究相对较少。另外,脉冲激光由于具有单脉冲能量大和脉宽短的特点<sup>[6-7]</sup>,可以获得远高于连续波激光的峰值功率,若在相同的平均功率条件下,可以在更短的时间内杀伤目标,更适合于战场环境应用。

不难看出,对多路脉冲固体激光器进行相干合成可以同时获得高平均功率、高峰值功率和高光束质量的激光输出,是固体激光器实现武器量级输出的一种新模式。本文通过在谐振腔内插入干涉合束器的方法,构建了迈克尔逊干涉复合腔结构<sup>[8-10]</sup>,实现了两路二极管抽运脉冲固体激光器的位相锁定,获得了单脉冲能量 $>300$  mJ 的相干合成激光输出,其合束效率 $>80\%$ 。该方案利用了两光束干涉的相消相长特性和谐振腔自身的增益损耗原理,具有自选择,自调整的特点,是一种可以定标放大的被动式相干合成技术。

## 2 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示。

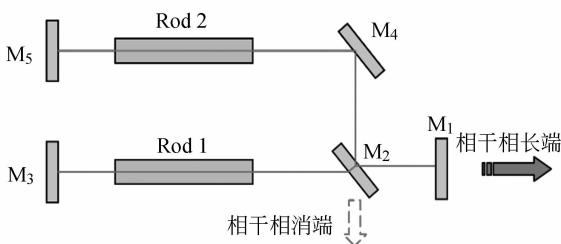


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

系统由两路二极管侧面抽运的 Nd:YAG 激光器组成,工作波长为 1 064 nm。激光器 1 由平面输出镜  $M_1$  ( $T=50\%$ )、 $45^\circ$ 干涉合束镜  $M_2$ 、增益介质  $rod_1$  和平面全反镜  $M_3$  组成,腔长为 200 mm;激光器 2 由平面输出镜  $M_1$ 、 $45^\circ$ 干涉合束镜  $M_2$ 、 $45^\circ$ 平面全反镜  $M_4$ 、增益介质  $rod_2$  和平面全反镜  $M_5$  组成,腔长为 250 mm;其中,干涉合束镜  $M_2$  右表面镀  $45^\circ$ 的 1 064 nm 半透半反膜,左表面镀有增透膜。增益介质尺寸均为  $\varphi 5 \times 60$  mm,掺杂浓度为 1%,两端镀增透膜,侧面磨毛。两激光器采用功率相同的环形脉冲激光二极管抽运,抽运脉宽为 200  $\mu$ s,重复频率为 1 Hz,两抽运模块采用串联工作方式以实现同步。

该系统的锁相原理如下:系统工作时,激光器 1 与激光器 2 内振荡的激光束相互入射到干涉合束镜  $M_2$  的右表面, $\varphi_1$  与  $\varphi_2$  表示两光束的相位,两光束分别产生各自的透射光(相位为  $\varphi_{1t}$  与  $\varphi_{2t}$ )与反射光(相位为  $\varphi_{1r}$  与  $\varphi_{2r}$ ),如图 2 所示。令  $\Delta\varphi_1 = \varphi_{1t} - \varphi_{2r}$ ,  $\Delta\varphi_2 = \varphi_{1r} - \varphi_{2t}$ ,理论计算<sup>[11]</sup>后可得  $\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \pi$ ,表明两路激光满足一个方向相干相长时,另一个方向必然满足相干相消。在如图 1 所示的谐振腔中,若  $\Delta\varphi_1$  的相位差满足不了相干相长的条件,则由于损耗过大,造成两激光器均无法独立起振。只有当两激光器某两种模式的相位差  $\Delta\varphi_1$  满足相干相长条件时,才能使损耗最小,最容易达到起振条件从而输出激光。

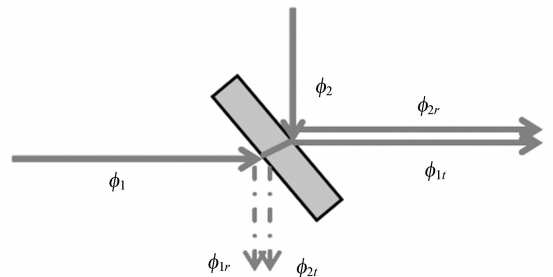


图 2 两路激光器在干涉合束镜上的相位分布图

Fig. 2 Phase distribution of two lasers at beam splitter

从上述分析中可知,只有两激光器自由振荡模式中满足干涉相长相位条件的模式具有最低的

腔损耗,可获得优先振荡,并抑制其它相位模式的振荡放大输出,从而获得稳定的相位锁定相干合成激光输出。

需要说明的是:(1)由于干涉合束镜  $M_2$  上镀的是半透半反膜,尽管两激光器的抽运功率相同,但在实验中还应尽量保持两激光器的输出能量一致,以满足两束光在干涉合束镜  $M_2$  上振幅比为 1 的要求,才能实现最高的合束效率。(2)由于该方案是结合谐振腔的损耗机理实现相位的自调节获得相位锁定的,优先获得振荡的必然是谐振腔中那些频率相同且相长端位相差为零的模式,然而随着抽运功率的增加,那些位相差较小但不为零的纵模甚至任何相位差的纵模也必然起振,这就要求采用该技术进行高功率相干合成时,必须采取相关辅助措施解决这一问题。

### 3 实验结果与分析

实验重点研究了两激光器的合束能量和合束效率随抽运电流的变化情况。其中合束效率定义为在相同的抽运条件下利用该装置实现相干合成后的输出能量与两激光器在独立振荡条件下的输出能量之和的比值。具体测量方法是:采用 EPM1000 型激光能量计,分别测量图 3 所示的两激光器单独运转时的输出能量与抽运电流的关系,再测量图 1 所示结构中两激光器的相干合成输出能量与抽运电流的关系,结果如图 4 所示,实验中所用的输出镜透过率均为 50%。

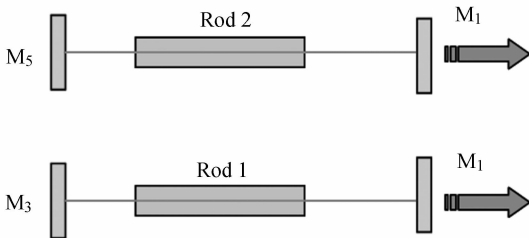


图 3 单个激光器结构图

Fig. 3 Structure scheme of single laser

从图 4 中可以看出,随着抽运电流的增加,两激光器的单独输出能量基本一致,满足振幅比为 1 的要求,同时合束能量逐渐增加,且未见饱和和现

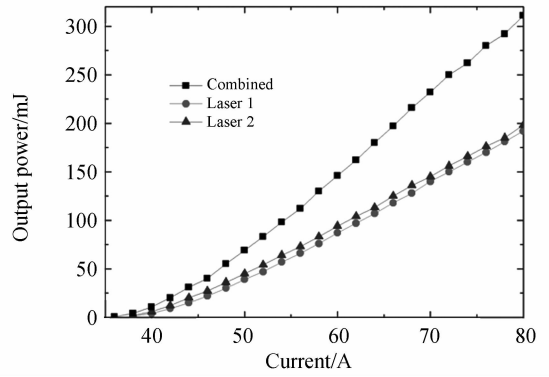


图 4 激光输出功率随抽运电流的变化曲线

Fig. 4 Characteristic curves of output powers changed with pumped currents

象,说明输出能量还可以进一步提高。当抽运电流为 80 A 时,输出相干合成单脉冲能量达 320 mJ。根据定义所测得的合束效率曲线如图 5 所示。

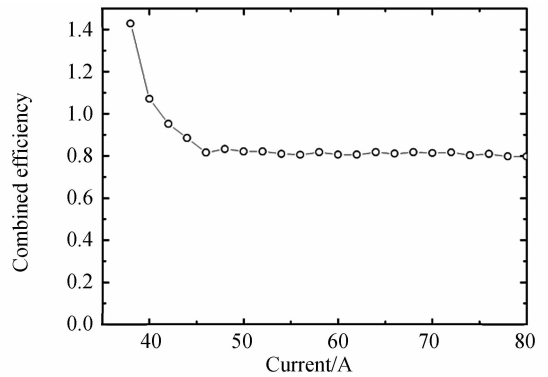


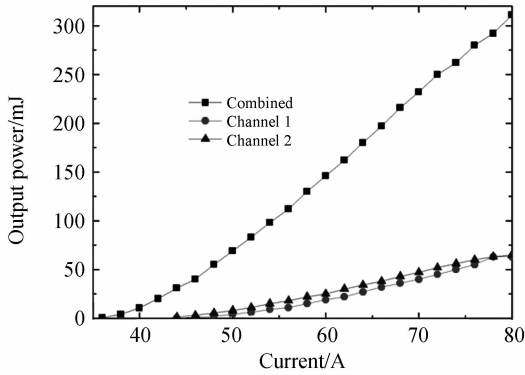
图 5 合束效率随抽运电流的变化曲线

Fig. 5 Characteristic curves of combining efficiencies changed with pumped currents

可以看出,随着抽运电流的增加,合束效率始终保持在 80% 左右,小抽运电流下出现的合束效率大于 1 的现象可能是因此时激光器处于阈值附近,能量波动较大导致的,其后的数据均是稳定输出后通过测量平均值得到的。

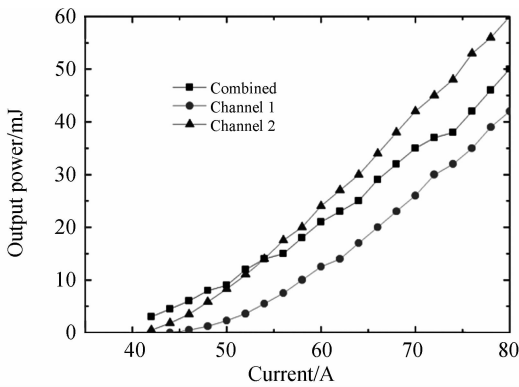
为了更直观地观察两激光器相位锁定后的相干相长现象和相干相消现象,验证利用该装置确实可实现两激光器的相干合成而非简单的能量叠加,实验还测量了图 1 所示装置中相干相长端和相干相消端锁相前后的输出能量变化情况。以相干相长端为例,在谐振腔中通过遮挡的方式分别

获得两个激光器合束前(独立振荡,未锁相)的各



(a)在相干相长端

(a) In constructive coherent direction



(b)在相干相消端

(b) In destructive coherent direction

图 6 激光输出功率随抽运电流的变化曲线

Fig. 6 Characteristic curves of output powers changed with pumped currents

自输出能量,然后测量了合束后(同时振荡,锁相)的共同输出能量,测量结果如图 6 所示。从图 6 (a)可以发现相干合束后的输出能量远大于合束前两激光器的输出能量之和,说明该装置实现了两激光器的位相锁定,发生了相干相长现象。然而实验也观测到在相干相消端始终有部分激光输出,并未达到完全相消,如图 6(b)所示。这有可能是由于两激光器的相位差不为 0,干涉光路并未完全重合,位相噪声、偏振态不一致和振幅比与干涉合束器的实际分光比不一致等原因造成的。目前课题组正在该技术的基础上通过采集这些残余光作为反馈信号,结合主动控制技术以解决这一问题,试图实现更高的合束效率和更大能量的相干合成。

## 4 结 论

理论分析了迈氏腔被动锁相机理,并利用该技术实现了两路脉冲固体激光器的相位锁定,获得了单脉冲能量 $>300$  mJ 的相干合成激光输出,合束效率约为 80%。由于是被动式相干合成,因此该技术具有结构简单、自适应、自组织等优点。采用该技术可以将多路激光直接相干合束到一路光束上,很好地解决了多路激光相干合成时遇到的占空比问题,特别适合多路固体激光器的相干合成。但理论上该方案也存在随着抽运功率增加带来的锁相几率下降的问题,课题组下一步将着重就该问题开展相关研究。

## 参考文献:

- [1] [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_release.html](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_release.html)[OL].
- [2] 刘泽金,周朴,侯静,等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究[J]. 中国激光,2009,36(3):518-524. LIU Z J, ZHOU P, HOU J, *et al.*. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(3):518-524.

- [3] 李剑峰,段开棕,王建明,等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. 光学学报,2008,28(5):923-926. LI J F, DUAN K L, WANG J M, *et al.*. Experiment of coherence-locking of two photonic crystal fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 923-926.
- [4] WANG W, HE B, ZHANG H B, *et al.*. 134 W phase locking of two-dimensional four-fiber lasers

- with improved self-imaging resonator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(7):680-682.
- [5] 程勇,刘洋,许立新,等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(1):77-81.  
CHENG Y, LIU Y, XU L X, *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(1):77-81.
- [6] 田国周,欧群飞,钟鸣,等. 2 kJ 高能钕玻璃激光器的热管理技术分析[J]. *激光技术*, 2007, 31(3):253-256.  
TIAN G ZH, OU Q F, ZHONG M, *et al.*. Thermal-management technology for a 2 kJ high energy Nd: glass laser[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3):253-256.
- [7] 李欣荣,周天文,矛和平,等. 18 J, 20 Hz 固体热容激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(8):38-40.  
LI X R, ZHOU T W, MAO H P, *et al.*. 18 J, 20 Hz solid state heat capacity laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(8):38-40.
- [8] 王会升,刘洋,韦尚方,等. 迈氏腔光纤激光器的相干合成[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8):1845-1850.  
WANG H SH, LIU Y, WEI SH F, *et al.*. Coherent combination of Michelson cavity fiber lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1845-1850.
- [9] 王建明,段开棕,王屹山,等. 两光纤激光器相干合成的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(9):5627-5631.  
WANG J M, DUAN K L, WANG Y SH, *et al.*. Experimental study of coherent beam combining of two fiber lasers[J]. *Acta Sinica Physica*, 2008, 57(9):5627-5631.
- [10] PENG Q, SUN Z, CHEN Y, *et al.*. Efficient improvement of laser beam quality by coherent combining in an improved Michelson cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(12):1485-1487.
- [11] 雷兵,冯莹,魏立安. 干涉型复合腔激光束相干合成中分束器的相移特性研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(6):1322-1326.  
LEI B, FENG Y, WEI L A. Phase-shift characteristic of beam splitter in coherent combining of laser beam with an interference compound cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6):1322-1326.

#### 作者简介:



卢常勇(1979—),男,福建南平人,讲师,2001年于军械工程学院获得学士学位,2010年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事固体激光器及其相干合成方面的研究。E-mail: lu\_changyong@126.com



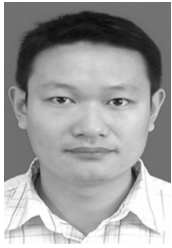
李莉(1981—),女,湖北麻城人,讲师,2003年于军械工程学院获得学士学位,主要从事光学系统方面的研究。E-mail: li\_li@126.com



刘旭(1983—),男,河南商丘人,讲师,2005年于装备指挥技术学院获得学士学位,2009年于空军雷达学院获得硕士学位,主要从事固体激光器及其相干合成方面的研究。E-mail: 01055108@163.com



朱孟真(1982—),男,湖北襄阳人,硕士,讲师,2004年、2007年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤激光器及其相干合成方面的研究。E-mail: mzhzhu@163.com



米朝伟(1980—),男,山东临沂人,讲师,2005年于临沂师范学院获得学士学位,2008年于解放军信息工程大学获得硕士学位,主要从事光纤激光相干合成方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net



黎伟(1982—),男,湖北咸宁人,讲师,2005年于装备指挥技术学院获得学士学位,主要从事光电系统控制方面的研究。E-mail: li\_wei@126.com



刘洋(1981—),男,四川达州人,博士,讲师,2003年于长春理工大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光纤激光器相关技术的研究。E-mail: lyssym@126.com



张广远(1981—),男,河北宁晋人,博士,讲师,2009年于军械工程学院获得博士学位,主要从事光电系统检测与故障诊断方面的研究。E-mail: zgygb2002@126.com

## ● 下期预告

# 新型共光路径向剪切干涉仪的设计

何 煦<sup>1,2</sup>, 马 军<sup>1\*</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为解决常规像移式干涉仪无法应用于大口径、长光路光学系统波像差检测的工程问题,设计了共光路径向剪切干涉仪,避免了采用标准波面所引入的系统误差。在设计中采用一种由三角棱镜与斜方棱镜组合而成的胶合棱镜组作为波面剪切器件,将待测波面与其复制波面产生干涉,并通过一组有不同相对孔径的透镜切换装置实现了干涉仪剪切比的控制。与4D动态干涉仪在不同条件下的比对试验数据表明,剪切干涉仪的测试重复精度约为 $\lambda/80$ ,实际测试精度RMS优于 $\lambda/20$ ( $\lambda=630\text{ nm}$ )。这种设计极大地缩小了仪器外形尺寸与重量,提高了超长光路干涉检测的效率。