

脉冲光纤激光被动相干偏振合成研究

冀翔 周朴 王小林[†] 栗荣涛 陆启生 赵伊君

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2012 年 4 月 26 日收到; 2012 年 7 月 11 日收到修改稿)

提出了脉冲激光被动相干偏振合成方案. 利用光反馈环形腔结构实现多路激光的自组织被动锁相, 利用级联偏振合束的结构实现多路激光偏振合成, 实现多路相干光束同轴输出. 开展了 4 路脉冲激光相干偏振合成实验研究, 获得了 91.9% 的合成效率, 可获得时域、空域特性均十分稳定的合成脉冲激光. 该方案为获得高功率脉冲光纤激光提供了一条可行的技术途径.

关键词: 脉冲光纤激光, 相干偏振合成, 被动锁相

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Ja, 42.55.Wd, 42.60.Gd

1 引言

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, 是当前激光技术领域研究热点, 脉冲运行的光纤激光器在激光加工、激光雷达等领域有广泛的应用前景^[1,2]. 受非线性效应、热效应、端面损伤和泵浦耦合等因素的限制, 单根光纤激光器输出功率存在极限^[3], 对多路光纤激光进行光束合成是突破单根脉冲光纤激光输出功率极限, 实现高功率高亮度激光输出的有效手段. 国内外针对连续激光光束合成的研究不断深入发展, 采用光谱合成^[4,5]、偏振合成^[6-8]、相干合成^[9,10]以及非相干合成^[11]等方法获得了高功率激光输出. 但由于脉冲激光的相位检测和控制、各路脉冲时域同步等难度较大, 光束合成的研究主要集中在连续光领域.

鉴于众多应用领域对脉冲激光输出功率的要求不断提升, 脉冲激光相干合成也逐渐成为热门研究领域. 2009 年 11 月美国国防部高级研究计划局发布了光纤激光脉冲源 (FILPS) 的项目公告, 用于发展高能量脉冲光纤激光器和放大器, 通过对多路光束的合成, 实现高能量脉冲光纤激光输出^[12]. 目前已有多家单位开展了脉冲激光光谱合成和相干

合成研究^[13-16].

以往脉冲激光相干合成的实验大都采用孔径拼接的空间输出结构, 由于光纤激光输出光束近似服从高斯分布, 因此阵列占空比不可能为 1, 导致大量激光能量耗散到旁斑, 光束质量严重退化^[17]. 本文提出对脉冲光纤激光的相干偏振合成方案, 实现多路光束同轴输出, 解决了输出阵列占空比的问题, 保证了合成光束的光束质量. 开展了 4 路脉冲激光相干偏振合成的实验研究, 获得了 91.9% 的合成效率.

2 基本原理和实验结构

首先介绍相干偏振合成的基本原理, 如图 1 所示. 两束正交偏振光的 Jones 矩阵可以简化表示为 $[E_x \exp(-j\delta_x), 0]^T$ 和 $[0, E_y \exp(-j\delta_y)]^T$, 合成后的 Jones 矩阵为

$$J = J_x + J_y = \begin{bmatrix} E_x \exp(-j\delta_x) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_y \exp(-j\delta_y) \end{bmatrix}$$

[†] E-mail: chinawxllin@163.com

$$= \begin{bmatrix} E_x \exp(-j\delta_x) \\ E_y \exp(-j\delta_y) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

对 (1) 式进行归一化处理

$$J = \frac{1}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}} \begin{bmatrix} E \\ E_y \exp(-j\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \exp(-j\delta_y) \sin \beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中

$$\frac{E_y}{E_x} = \tan \beta, \quad \delta = \delta_x - \delta_y. \quad (3)$$

一般情况下, 合成后的光束为随机椭圆偏振光, 如图 1(a) 所示, 如果能将参与合成的两路正交偏振光束的相位差 δ 锁定为 $n\pi$ (n 为整数), 则合成后的光束为线偏振光, 如图 1(b) 所示. 合成后的线偏振光通过半波片调节偏振态, 又可以和另一束偏振方向垂直的线偏振光进行合成, 从而实现多路光束的合成 [17,19].

在上述基本原理的基础上, 本文搭建环形腔激光阵列, 开展脉冲激光相干偏振合成实验. 实验系统如图 2 所示. 种子源激光通过 2×1 耦合器耦合进环路, 在进行预放后经过 1×4 分束器分为 4 束, 每束经过相放大器 (AMP)、隔离器 (ISO) 和准直器后

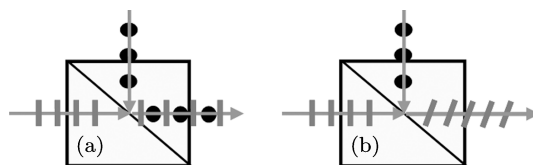


图 1 PBC 两路偏振正交光束合成示意图 (a) 未锁相状态; (b) 锁相状态

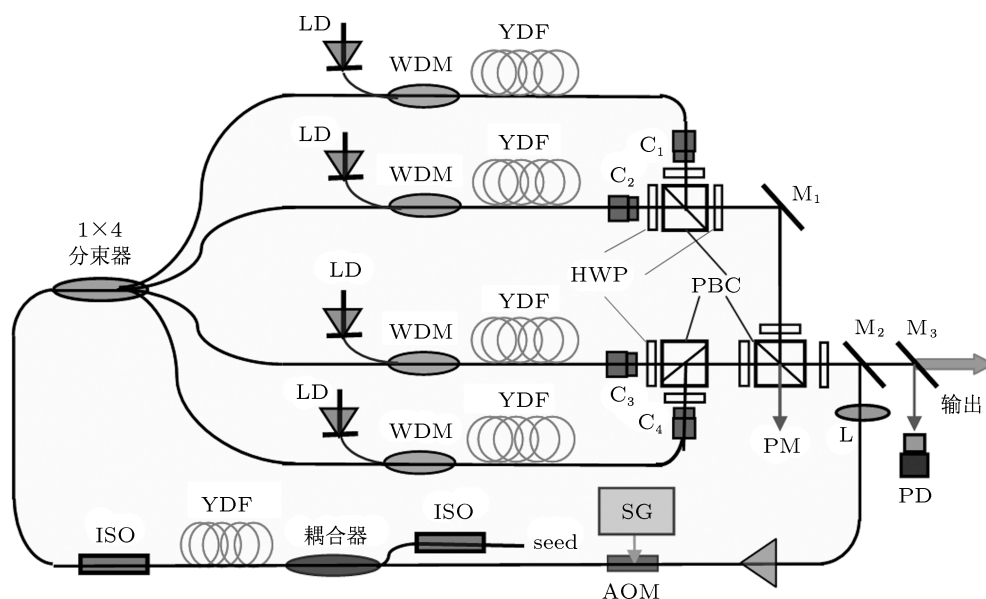


图 2 环形腔脉冲光纤激光四路相干偏振合成结构图 (seed: 种子激光; LD: 激光二极管; WDM: 波分复用器; AOM: 声光调制器; C1—C4: 准直器; HWP: 半波片; ISO: 隔离器; PBC: 偏振光束耦合器; L: 透镜; PD: 光电探测器; PM: 功率计; M1: 全反镜; M2, M3: 1:99 分束镜)

准直输出的线偏光的偏振态通过半波片 (HWP) 的旋转进行调节, 使入射到每个偏振合束器 (PBC) 上的两路线偏振光的偏振方向互相垂直, PBC 将两束偏振方向正交的线偏光合成一束, 从而实现偏振合成. 输出光束的一部分通过透

镜 L 耦合进单模光纤构成反馈, 耦合进单模光纤的激光经过一个声光调制器后与耦合器连接, 通过对 AOM 施加不同的驱动信号, 可获得不同特性的脉冲输出, 通过各路光束的自组织机制对相位进行被动锁定 [20,21]. AOM 通过信号发生器调节调

制频率和占空比, 以获得不同的脉冲波形. 种子源激光器的工作波长为 1064 nm, 实验采用的硅光电探测器光谱响应范围为 200—1100 nm, 响应带宽在 10 dB 增益时为 1.25 MHz.

开通 AOM, 调节种子光对系统进行闭环调试, 当种子光降到一定程度 (实验中为种子光抽运电流 80 mA 以下), 可以在示波器上观察到波动起伏减小和稳定脉冲出现. 此时参与合成的 4 路光束的相位差为 $n\pi$, 经 PBC1 和 PBC2 的合成光变成线偏光, 入射到 PBC3 上的两路光束的偏振态互相垂直, 从而实现 4 路光束的偏振合成.

3 实验结果和讨论

在实验中, 首先用一只 50:50 耦合器将波长为 1064 nm、输出功率为 40 mW 的种子激光耦合进环路, 该种子激光在反馈回路建立前作为四路放大器的种子, 起到保护和进行闭环调节的作用. 用焦距为 3.5 mm 的透镜 L 将 M_2 分出来的光耦合进单模光纤. 利用光电探测器探测 M_3 分出来的光, 用以观察时域变化. 在种子源功率较大时, 四路光合束后波形的幅度起伏很大, 光斑强度随时间快速闪烁, 系统处于开环状态. 随着种子光功率的减小, 幅度起伏和光斑强度起伏也变小, 种子光减小到 0.5 mW 以下直到完全关闭时, 系统反馈回路迅速构成闭环, 光斑和闭环脉冲开始稳定, 系统进入锁相状态.

实验中参与合成的 4 路光束通过准直器后的功率分别为 92.5, 108.4, 99.0 和 100.0 mW, 锁相后在 M_2 的透射端测量合成后的输出功率为 367.5 mW (PBC3 非光路出射方向测得功率

为 24.6 mW), 合成效率达 91.9%.

在时域特性方面, 图 3 为开环时四路光合束后波形的幅度起伏, 图 4(a), (b) 分别为系统由开环到闭环和由闭环到开环时示波器显示的时域图像. 此时, AOM 施加频率 10 kHz、占空比 10% 的驱动信号. 图 4(c) 为闭环状态下长时间尺度内脉冲输出波形. 当系统处于开环时, 波形抖动幅度很大, 说明相位的随机起伏对光强的分布产生很大的影响, 当系统进行闭环时, 光电探测器的输出基本保持稳定, 说明 4 路光路之间的相位噪声得到了有效补偿, 合成后的光束相干度明显提高.

在光斑特性方面, 当系统处于开环时, 参与合成的每一路激光束相位的起伏造成合成后的光斑强度和分布随机起伏. 图 5 是选取 4 个不同时刻开环的光斑分布, 开环时光场的光强分布起伏很大, 光斑不稳定, 能量集中度不高. 当整个系统实行闭环控制后, 光斑仪上可以看到稳定的光斑图像, 且光强分布稳定, 如图 6 所示.

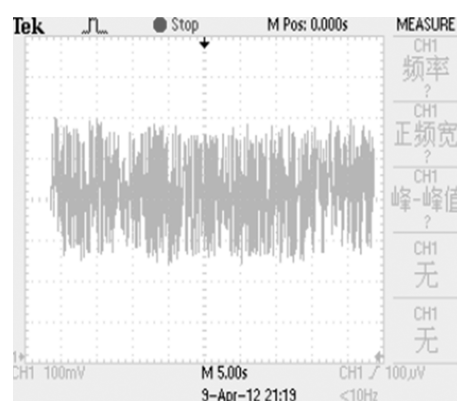


图 3 开环时四路光合束后波形的幅度起伏

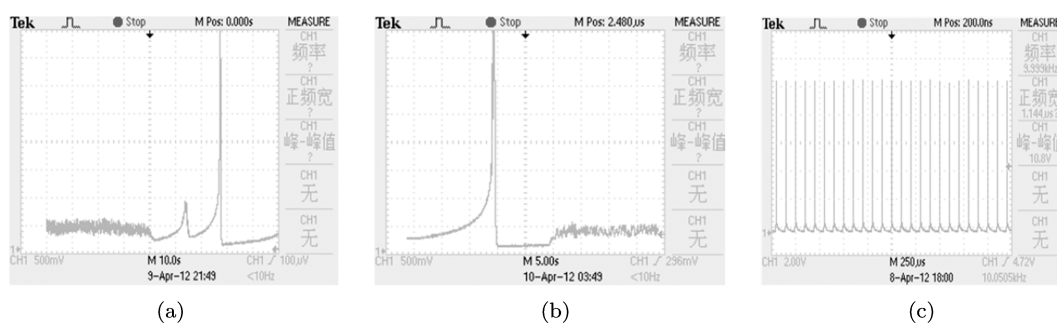


图 4 开环和闭环时合成输出的时域图像 (a) 从开环到闭环; (b) 从闭环到开环; (c) 闭环长时间尺度脉冲图形

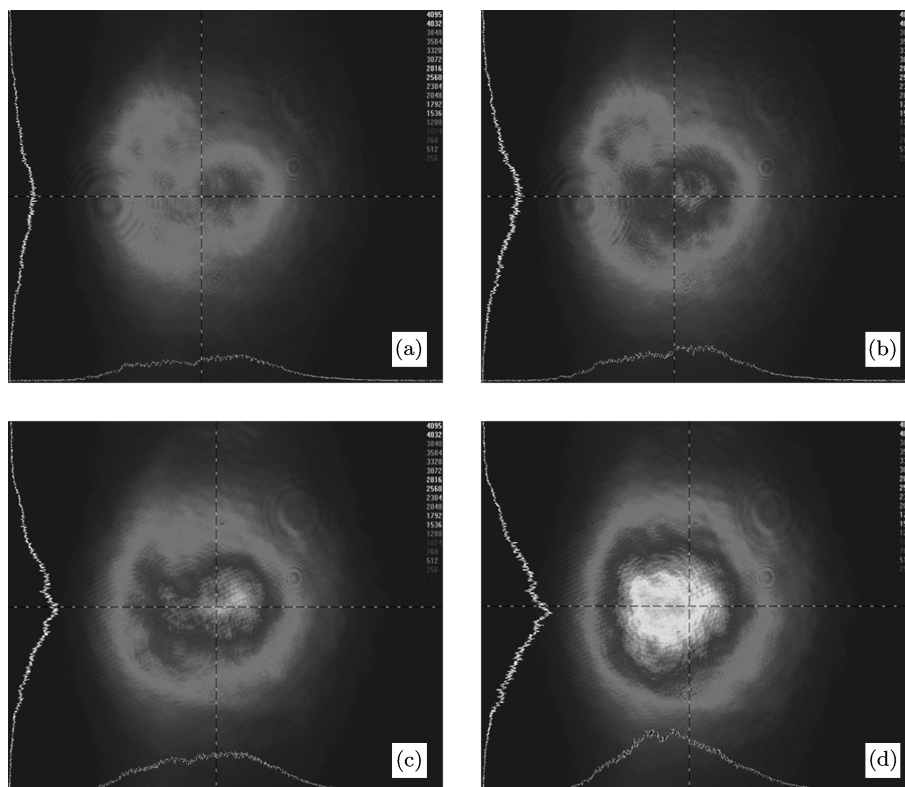


图5 开不同时刻开环的光斑分布

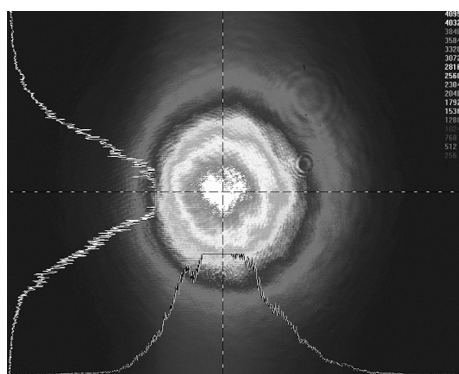


图6 闭环后稳定的光斑图像

系统闭环状态下的输出光谱如图7所示, 中心波长为 1063.4 nm, 长时间检测结果表明, 系统输出的激光光谱十分稳定.

需要说明的是, 本文合成效率为 91.9%, 尚未达到 100% 的理想合成效率. 影响合成效率的因素主要有同轴性误差、相位残差、振幅比等因素, 合成效率难以达到 100%, 其中同轴性误差影响最大, 较小的同轴性误差就可以引起耦合效率的大幅下降, 导致合成效率的迅速降低. 使用高精度的调整

架和耦合系统, 可以进一步提高相干偏振合成的合成效率.

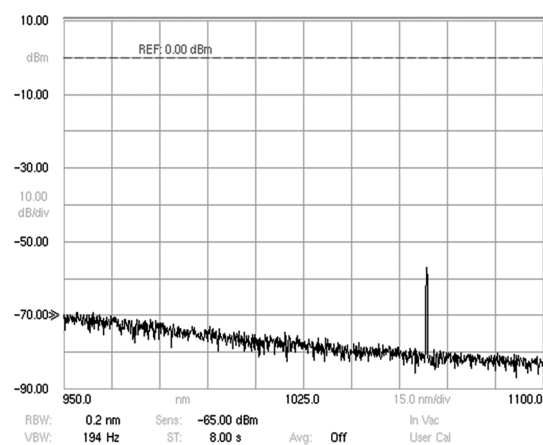


图7 闭环输出光谱

4 结 论

本文提出了脉冲激光的相干偏振合成方案, 并开展了实验研究. 实现了 4 路偏振激光的同轴输出,

合成效率达 91.9%. 采用多路光束同轴输出, 避免了孔径拼接输出结构的旁斑能量耗散问题. 输出脉冲特性和光斑稳定性好, 获得较好的合成效果. 本

文实验结果为脉冲激光的相干合成, 提高输出功率提供一种实用的方案.

-
- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** B63
 - [2] Wright M W, Valley G C 2005 *J. of Lightwave Tech.* **23** 1369
 - [3] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, Shverdin M Y, Stappaerts E A, Sridharan A K, Pax P H, Heebner J E, Siders C W, Barty C P J 2008 *Opt. Express* **16** 13240
 - [4] Li L B, Lou Q H 2006 *Laser & Optoelectronics Progress* **43** 37 (in Chinese) [李立波, 楼祺洪 2006 激光与光电子学进展 **43** 37]
 - [5] Klingebiel S, Röser F, Ortaç Bülel, Limpert J, Tünnermann A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1716
 - [6] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, Wang X L, Liu Z J 2012 *Laser & Optoelectronics Progress* **49** 070005 (in Chinese) [马鹏飞, 周朴, 马阎星, 王小林, 刘泽金 2012 激光与光电子学进展 **49** 070005]
 - [7] Lu C Y, Liu X, Liu Y, Li L, Wang X B, Wan Q, Guo Y L, Wei S F 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1437 (in Chinese) [卢常勇, 刘旭, 刘洋, 李莉, 王小兵, 万强, 郭延龙 2009 中国激光 **36** 1437]
 - [8] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G 2010 *IEEE J. Quantum Electron* **46** 1191
 - [9] Liu Z J, Zhou P, Wang X L, Ma Y X, Xu X J, Hou J 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 2221 (in Chinese) [刘泽金, 周朴, 王小林, 马阎星, 许晓军, 侯静 2010 中国激光 **37** 2221]
 - [10] Flores A, Shay T M, Lu C A, Robin C, Pulford B, Sanchez A D, Hult D W, Rowland K B 2011 *OSA/CLEO CFE3*
 - [11] Sprangle P, Ting A, Peñano J, Fischer R, Hafizi B 2009 *IEEE J. Quantum Electron* **45** 138
 - [12] Fiber laser pulse source project, [https://www.fbo.gov/index?s=opportunity &mode=form&id=d1ad3a1b11564d97b76108acfd4d09d8tab=core&cvview=0](https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=d1ad3a1b11564d97b76108acfd4d09d8tab=core&cvview=0) [2012-4-25]
 - [13] Jiang S F, Hanna M, Druon F, Georges P 2010 *Opt. Lett.* **35** 1293
 - [14] Schmidt O, Klingebiel S, Ortaç B, Röser F, Brückner F, Clausnitzer T, Kley E B, Limpert J, Tünnermann A 2008 *SPIE* **6873** 687317
 - [15] Schmidt O, Wirth C, Tsybin I, Schreiber T, Eberhardt R, Limpert J, Tünnermann A 2009 *Opt. Lett.* **34** 1567
 - [16] Su R T, Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Xu X J 2011 *Laser & Optoelectronics Progress* **48** 101401 (in Chinese) [栗荣涛, 王小林, 周朴, 马阎星, 许晓军 2011 激光与光电子学进展 **48** 101401]
 - [17] Zhou P, Wang X L, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2010 *Laser & Optoelectronics Progress* **47** 021401 (in Chinese) [周朴, 王小林, 马阎星, 马浩统, 许晓军, 刘泽金 2010 激光与光电子学进展 **47** 021401]
 - [18] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G 2010 *Appl. Opt.* **49** 6762
 - [19] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, Su R T, Liu Z J 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0402009 (in Chinese) [马鹏飞, 周朴, 马阎星, 栗荣涛, 刘泽金 2012 中国激光 **39** 0402009]
 - [20] Xue Y H, ZHOU J, HE B, Li Z, Qi Y F, Liu C, Lou Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7869 (in Chinese) [薛宇豪, 周军, 何兵, 李振, 漆云凤, 刘驰, 楼祺洪 2010 物理学报 **59** 7869]
 - [21] Xue Y H, He B, Zhou J, Li Z, Fan Y Y, Qi Y F, Liu C, Yuan Z J, Zhang H B, Lou Q H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 054212

Polarized beam coherent combination of pulsed fiber

Ji Xiang Zhou Pu Wang Xiao-Lin[†] Su Rong-Tao Lu Qi-Sheng Zhao Yi-Jun

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

(Received 26 April 2012; revised manuscript received 11 July 2012)

Abstract

Polarized beam coherent combination of pulsed fiber laser is studied. The self-organizing passive phase lock of multilevel high power Yb-doped fiber amplifiers is achieved with optical feed-back ring cavity. Polarized beam coherent combination and multi-channel beam coaxial output are realized by using cascade polarized combining configuration. Polarized beam coherent combination of four Yb-doped fiber amplifiers is experimentally demonstrated, The efficiency of coherent combination is up to 91.9%. Stable combination pulsed fiber laser with temporal and spatial characteristic is achieved. This approach provides a feasible technique for power scaling of high-power pulsed fiber laser.

Keywords: pulse fiber laser, polarized beam coherent combination, passive phase locking

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Ja, 42.55.Wd, 42.60.Gd

[†] E-mail: chinawxllin@163.com