

3 × 1 光子灯笼实现 30 μm 纤芯光纤 激光模式控制

陆瑶^{*}, 姜宗福, 刘文广, 陈子伦, 姜曼^{**}, 周琼, 张江彬

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 通过优化设计,制备出了性能优良的 3 × 1 光子灯笼,将其与纤芯直径为 30 μm 的多模光纤熔接,应用空间模式自适应控制,实现了稳定可控的准单模输出,突破了以往光子灯笼模式匹配的设计原则,拓展了光子灯笼多模光纤端纤芯直径的可选范围。该系统利用随机并行梯度下降算法对输入端的各路相位调制器进行主动控制,当评价函数选取为桶中功率时,多模光纤端输出光束的基模占比超过 85%,表征光束质量的 M^2 因子稳定在 1.18 以下,这为解决大模场光纤激光中的模式不稳定问题提供可能。当评价函数选取为单一高阶模的模式含量时,输出端的该高阶模含量超过 95%。

关键词 光纤光学; 光纤激光; 模式; 自适应光学; 光束整形

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1736001

Laser Mode Control in Fiber with Core Diameter of 30 μm Based on 3 × 1 Photonic Lantern

Lu Yao^{*}, Jiang Zongfu, Liu Wenguang, Chen Zilun, Jiang Man^{**},
Zhou Qiong, Zhang Jiangbin

*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract By optimizing the parameter design, this paper prepared a 3 × 1 photonic lantern with excellent performance. It was fused with a multimode fiber with a core diameter of 30 μm. The stable and controllable quasi-single-mode output is achieved by spatial mode adaptive control and the traditional design principle of photonic lantern mode matching is broken through. Moreover, the optional range of the core diameter at the photonic lantern multimode fiber end is expanded. The stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is used to actively control the phase modulator at the input end. When the evaluation function is selected as the barrel power, the fundamental mode proportion of the output beams at the multi-mode fiber end is higher than 85%, and the quality factor M^2 of the beams is stably below 1.18, which provides a possibility to solve the problem of mode instability in large-mode-field fiber laser. When the evaluation function is selected as the mode content of a single high-order mode, the corresponding high-order mode content at the output end exceeds 95%.

Key words fiber optics; fiber laser; modes; adaptive optics; beam shaping

OCIS codes 060.3510; 030.4070; 220.1080; 140.3300

光子灯笼作为一种新型全光纤光学元件,能够通过合束突破单根光纤的输出功率极限,同时可以

配合自适应控制系统,解决大模场(LMA)光纤激光中模式能量耦合、光束质量变差的问题,高效地实现

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-05-07; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61905281,12074432)

通信作者: *lybenben1@163.com; **jiangman7@126.com

多模光纤系统中空间模式控制^[1]。2012 年, Fontaine 等^[2]提出光子灯笼重要的设计准则——模式匹配,即输入单模光纤孔径数等于输出光纤支持模式数量。2016 年 2 月,林肯实验室将满足这种设计准则的 3×1 光子灯笼应用在空间模式自适应控制系统中,在纤芯为 $20 \mu\text{m}$ (支持三个模式传输) 的光纤中实现了高光束质量的稳态基模输出^[3]。同年,中佛罗里达大学将掺铒光纤熔接到 3×1 光子灯笼输出端,实现了三个空间模式的选择性放大^[4]。2017 年,林肯实验室通过增加对输入振幅和偏振的控制,验证了包含 3×1 光子灯笼的模式控制系统可以有效提高模式不稳定(TMI)出现的功率阈值^[5]。本文通过优化光子灯笼输入端单模光纤的芯包比,扩展了输出端多模光纤的直径上限,突破了以往光子灯笼设计上的模式匹配原则,并基于套管法拉制出结构优化的 3×1 光子灯笼,搭建空间模式自适应控制系统,利用随机并行梯度下降(SPGD)算法对输入光场的相位进行控制^[6],最终在纤芯直径为

$30 \mu\text{m}$ 的 LMA 光纤(数值孔径 $NA=0.08$) 输出端实现了稳定可控的单一模式输出。

理想的光子灯笼可视为一个线性的光学元件,光束从单模光纤束一端注入,在经过腰区过程中,随着尺寸的减小,单模光纤束的纤芯逐渐靠近,芯径逐渐变小,输入的光场发生模式演化。欲使模式演化的结果为纯净的基模或高阶模,则需对三根纤芯输入具有恰当振幅、相位组合的基模光场。如图 1(a) 所示,为使光子灯笼输入端单模光纤达到最佳芯包比,在拉制前对单模光纤进行包层腐蚀预处理,使得被氢氟酸腐蚀过的单模光纤纤芯、包层直径分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $110 \mu\text{m}$, $NA=0.06$ 。选取纤芯、包层直径分别为 $30 \mu\text{m}$ 和 $130 \mu\text{m}$, $NA=0.08$ 的 LMA 光纤作为输出光纤;该光子灯笼可承受千瓦级以上的光功率。图 1(b) 为显微镜下观察的单模光纤束腰区切割端面。图 1(c) 第一行表示输出目标为基模时的模式演化过程;第二行、第三行表示输出目标为 LP_{11} 模时的模式演化过程。

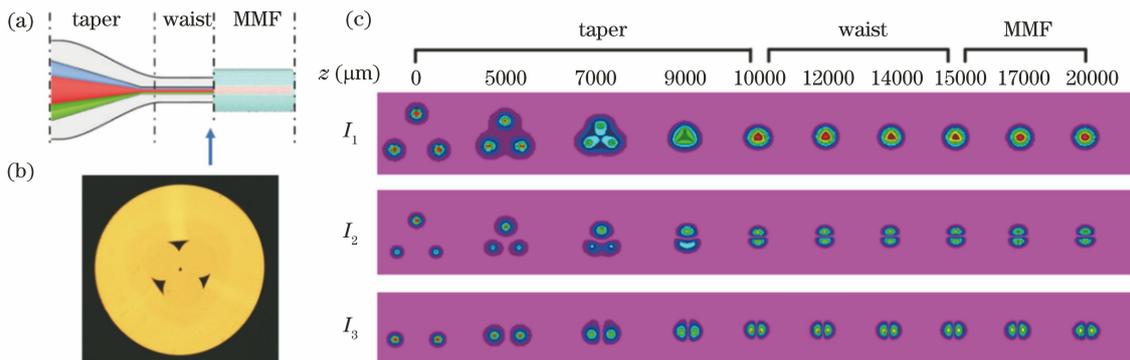


图 1 光子灯笼结构示意图及模式演化过程。(a) 光子灯笼结构示意图;(b) 显微镜下观察的单模光纤束腰区切割端面;(c) 理想情况下光束在 3×1 光子灯笼中的模式演化过程

Fig. 1 Diagram of photonic lantern structure and mode evolution process. (a) Diagram of photonic lantern structure; (b) cut end face of waist region of single-mode fiber bundle observed under microscope; (c) mode evolution of ideal beam in 3×1 photonic lantern

在实际光子灯笼系统中,各路之间的相位差起伏会对模式演化的结果产生极大影响,导致光子灯笼输出端的光斑不断变化且不规则。为在输出端得到稳定可控的单一模式输出,必须结合自适应光学(AO)技术的思想,将探测到的输出光场主动反馈给输入端的调制器,并对影响因素进行补偿和控制。图 2 为基于光子灯笼的空间模式自适应控制系统。其中光源为波长为 1064 nm 的单频激光器。系统选取 SPGD 算法,根据输出端探测器反馈的桶中功率对输入端的相位调制器进行主动控制。系统中 CCD 用于采集实时近场光斑,并将采集数据传输给计算机进行模式分解。

图 3 为当目标模式为基模,评价函数选取为桶中功率时,控制算法闭环前后输出光束的 M^2 因子变化情况以及 CCD 采集到的近场光斑形态变化。通过分束器将 0.9 W 的 1064 nm 单频激光功率等分到光子灯笼三路输入端,目标模式为基模。如图 3 所示,在控制开环情况下,光斑形态随时间不断变化,能量在不同模式之间耦合,光束质量较差;在控制闭环情况下,光斑稳定在准基模形态,经模式分解计算得知,此时基模占比在 85% 以上,光束质量较好, M^2 因子稳定在 1.18 以下。

图 4(a) 为当评价函数选取为 LP_{11} 模的模式占比时,控制闭环后 CCD 探测到的近场光斑以及通过

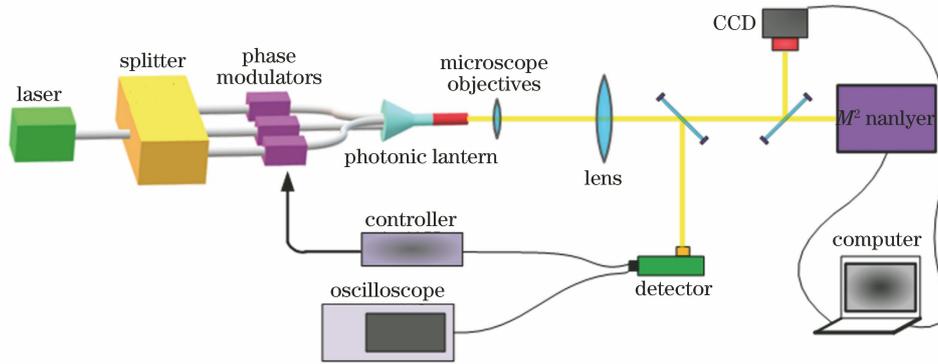


图 2 基于光子灯笼的空间模式自适应控制系统示意图

Fig. 2 Spatial pattern adaptive control system based on photonic lantern

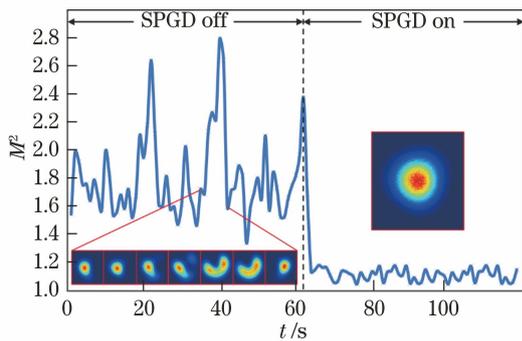


图 3 基模输出效果图

Fig. 3 Image of fundamental mode output

模式分解算法得到的重构光斑,其中实测光斑与重构光斑的相关度为 0.9778,此时测得的 LP_{11o} 模的模式占比为 96.33%;图 4(b)为当评价函数选取为 LP_{11e} 模的模式占比时,控制闭环后 CCD 探测到的近场光斑以及通过模式分解算法得到的重构光斑,其中实测光斑与重构光斑的相关度为 0.9739,此时

测得的 LP_{11e} 模的模式占比为 95.58%。

该系统利用结构优化的 3×1 光子灯笼,制备具备恰当芯包比的单模光纤作为输入光纤,突破了模式匹配原则,提升了输出光纤纤芯直径上限,在纤芯为 30 μm 的大模场光纤输出端实现了单一模式输出。当控制算法的评价函数选取为桶中功率时,输出光束的基模占比稳定在 85% 以上, M² 因子稳定在 1.18 以下。尽管实验结果是在瓦量级功率条件下获得的,但该结果将对高能激光系统中使用更大模场光纤实现高功率、高光束质量、稳定输出提供可能的技术方案。当控制算法的评价函数选取为特定高阶模含量时,输出端的相应高阶模含量超过 95%,这将在光纤通信空分复用技术、特定形状的激光加工以及粒子操纵等领域具有重要应用。控制更多孔径光子灯笼,优化控制算法和控制因素,实现更大模场、更多模式种类、更高功率稳定可控输出,是本课题组下一步工作的一项重要研究内容。

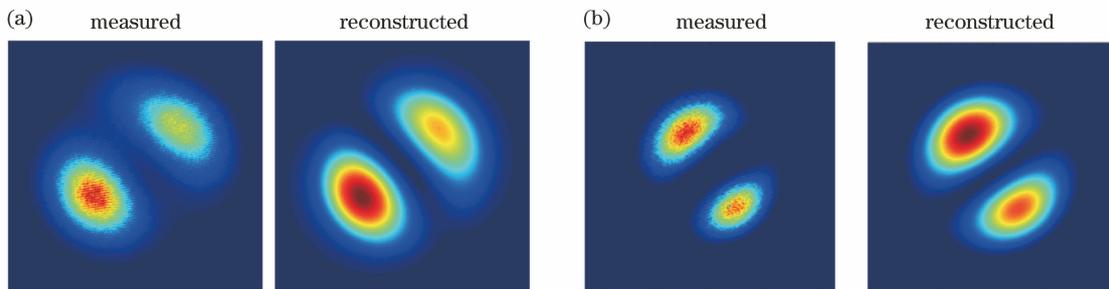


图 4 高阶模输出效果图。(a) LP_{11o} 模;(b) LP_{11e} 模

Fig. 4 Images of high-order mode outputs. (a) LP_{11o} mode; (b) LP_{11e} mode

参 考 文 献

[1] Leon-Saval S G, Argyros A, Bland-Hawthorn J. Photonic lanterns[J]. Nanophotonics, 2013, 2(5/6): 429-440.
 [2] Fontaine N K, Ryf R, Bland-Hawthorn J, et al. Geometric requirements for photonic lanterns in space

division multiplexing[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27123-27132.
 [3] Montoya J, Aleshire C, Hwang C, et al. Photonic lantern adaptive spatial mode control in LMA fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3405-3413.

- [4] Wittek S, Ramirez R B, Zacarias J A, et al. Mode-selective amplification in a large mode area Yb-doped fiber using a photonic lantern [J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2157-2160.
- [5] Montoya J, Hwang C, Martz D, et al. Photonic lantern kW-class fiber amplifier [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27543-27550.
- [6] Lu Y, Jiang Z F, Liu W G, et al. Orbital angular momentum mode generation system based on photonic lantern [J]. Journal of Optics, 2019, 21(12): 125702.