

基于二维光场计算的 400 束规模激光相干合成

常琦, 侯天悦, 邓宇, 常洪祥, 龙金虎, 马鹏飞*, 粟荣涛, 马阎星, 周朴*

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220276

高功率光纤激光具有结构紧凑、效率高、可柔性操作等特点, 在工业加工、材料成型等领域已得到广泛应用。随着纤芯功率密度的不断提升, 光纤中产生的非线性效应和热致模式不稳定效应成为单束光纤激光亮度提升的重要物理限制因素。以模块化的单路光纤激光为合成单元, 通过阵列拼接和高效锁相控制, 实现阵列激光的相干合成输出是突破单路光纤激光亮度提升受限的主要技术手段之一。

针对相干合成系统而言, 合成系统的路数拓展能力是决定其亮度提升能力的主要因素之一。近年来, 国内外科研人员先后报道了相干合成技术在阵元拓展方面的研究结果, 具有代表性的有: 2020 年, 法国 Thales 公司利用干涉条纹测量技术实现了 61 路飞秒光纤激光的相干合成, 系统控制残差 $\sim\lambda/55$; 2021 年, 美国 Lawrence Berkeley 国家实验室通过机器学习技术实现了 81 束激光阵元相干合成, 系统控制残差 $\sim\lambda/18$; 同年, 法国 Limoges 大学运用准强化学习方法实现了 100 路光纤激光的相干合成, 系统控制残差 $\sim\lambda/30$ 。笔者课题组长期从事相干合成技术研究, 基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法开发了高速高精度相位控制器, 2014 年实现了 32 路光纤激光相干合成, 合成光束的归一化平均功率从开环时的 0.037 提高到 0.95, 系统控制残差 $\sim\lambda/28$; 2019 年实现了 60 路光纤激光的相干合成, 系统控制残差 $\sim\lambda/30$; 2020 年实现了 107 路光纤激光的相干合成, 系统控制残差 $\sim\lambda/22$ 。

最近, 笔者课题组开发了基于二维图像处理的同步相位计算技术, 克服了随着阵元数目增多系统控制

带宽下降、残差增大的难题, 构建了大阵元相干合成实验验证系统, 实现了千瓦级光纤激光放大器采集到的相位噪声下 397 单元光束相位控制, 控制残差优于 $\lambda/31$, 中央主瓣功率占比达 59.51%。实验系统结构如图 1 所示。波长为 1064 nm 的单频种子光 (Seed) 首先经单模光纤预放大器 (AMP) 放大, 随后经过光纤准直器 (CO) 准直输出到自由空间。输出激光首先经过一个半波片 (HWP) 和偏振片 (P) 获得竖直方向的线偏光, 再经过分束器 (BS) 进行分束, 反射光为参考光, 透射光为主激光。主激光经过强度型空间光调制器 (SLM1) 进行强度调制为 397 单元光束, 调制后的主激光经过一个水平偏振的 P 滤除未调制部分, 再通过一个 HWP 将偏振方向旋转至竖直方向。SLM1 产生的 397 单元光束通过相位型空间光调制器进行相位调制和控制, 其中, 第一个相位型空间光调制器 (SLM2) 以 200 Hz 的高刷新频率, 施加测量得到的千瓦级窄线宽光纤放大器中的动态活塞相位噪声, 第二个相位型空间光调制器 (SLM3) 负责相位噪声的实时

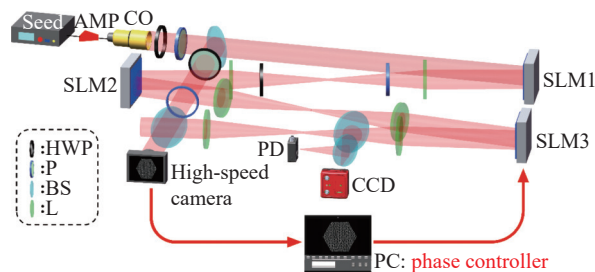


图 1 实验结构图

Fig.1 Experimental schematic

收稿日期: 2022-05-02; 修订日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金 (62075242); 湖南省创新研究群体基金 (2019 JJ10005); 湖南创新型省份建设专项 (2019 RS3017)

作者简介: 常琦, 男, 博士生, 主要从事光束合成方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 周朴, 男, 研究员, 博士, 主要从事大功率光纤激光、光束合成等方面的研究。

通讯作者: 马鹏飞, 男, 副研究员, 博士, 主要从事高功率窄线宽光纤激光及其合成方面的研究。

矫正。参考光在经过 HWP 和 P 后与主激光通过一个 BS 发生干涉,高速相机实时捕获反射后的图像信息,从每个子单元的干涉条纹中计算获得子单元的活塞相位,并施加给 SLM3 中子单元对应像素区域进行高效闭环控制。SLM1 和 SLM2、SLM2 和 SLM3、SLM3 和高速相机之间放置着由 6 个透镜(L)构成的 3 组 4*f* 系统,以保证四个器件靶面的光学共轭性。合成光斑数据采集模块由两个 BS、光电探测器(PD)和光斑采集相机(CCD)构成。实验中,高速相机探测到的阵列光斑图样如图 2(a1)所示,探测到的干涉光斑如图 2(b1)所示。当系统处于开环状态时,PD 探测

到的光强起伏如图 2(a2)所示,其 0~1 000 Hz 的频谱分布对应图 2(b2)所示,远场光斑 100 s 长曝光图如图 2(a3)所示;当系统处于闭环状态时,远场光斑 100 s 长曝光图如图 2(b3)所示;通过计算 397 单元外接圆对应的远场艾里斑内能量占比,闭环时中央主瓣能量占比由开环时的 0.62% 提升至 59.51%。该实验结果是国际上光纤激光阵元相干合成的最高控制路数,验证了基于二维光场计算技术在千瓦级光纤激光放大器动态活塞相位噪声下对 397 阵元具有高效的相位锁定能力,有望应用到更大阵元数目光纤激光相干合成系统。

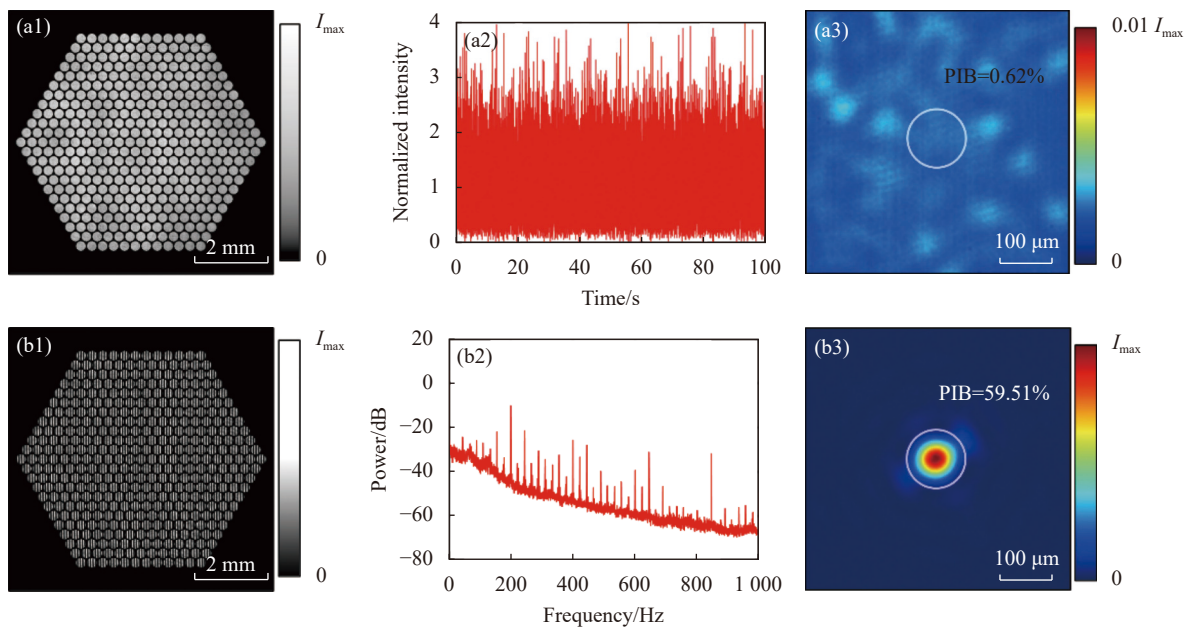


图 2 实验结果图。(a1) 实验阵列光斑强度图;(a2) 开环小孔内光强时域分布;(a3) 开环长曝光图局部图;(b1) 干涉条纹强度分布图;(b2) 开环小孔内光强频谱图;(b3) 闭环长曝光图局部图

Fig.2 Experimental results. (a1) The intensity profile of the laser array; (a2) The time-domain distribution of the light intensity inside the pin-hole in the open-loop state; (a3) The zoomed long exposure image in the open-loop state; (b1) The intensity profile of interference fringes; (b2) The spectrogram of light intensity inside the pin-hole in the open-loop state; (b3) The zoomed long exposure image in the close-loop state

致谢 感谢吴函烁、张雨秋、李魏、陈潇、罗根、何姝玥在实验器件与数据采集等工作中提供的帮助。