

中国激光

强噪声下光纤激光相干合成突破千路

受限于热效应、非线性效应、光纤材料损伤、泵浦亮度等因素,单路光纤激光功率的提升能力有限。高亮度光束合成是突破单路光纤激光功率提升限制的主要技术途径,其中光纤激光阵列相干合成技术是产生高功率高光束质量激光的有效方式之一。

近年来,光纤激光相干合成技术在输出功率和合成路数提升方面均取得了显著的进展。在输出功率方面,2011年 Ma 等^[1]率先突破 1 kW, Flores 等^[2]于 2016 年实现了 4.9 kW 合成输出;2017年,刘泽金等^[3]实现了 5.02 kW 高光束质量共孔径合成输出;2020年, Ma 等^[4]、Müller 等^[5]、Shekel 等^[6]分别报道了 7.1、10.4、16 kW 的相干合成系统;2021年,吴坚等^[7]进一步将相干合成系统的输出功率提升至 21.6 kW。在合成路数方面,2011年 Bourderionnet 等^[8]实现了 64 路光纤激光的相位控制,系统锁相精度低于 $\lambda/10$ (λ 为入射波长);2019年,Chang 等^[9]实现了 60 路光纤激光的相干合成,锁相残差为 $\sim\lambda/30$;2019年, Fsaifes 等^[10]实现了 37 路飞秒光纤激光的相位控制,系统的锁相控制回路频率为 kHz 量级;2020年,该团队进一步将系统控制路数提升至 61 路,当每路激光输出功率为 4 W 与 20 W 时,锁相残差分别为 $\lambda/93$ 与 $\lambda/55$ ^[11];2020年,Chang 等^[12]基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的相位控制方法实现了 107 路光纤激光的相干合成,闭环状态的相位残差为 $\sim\lambda/22$;2021年, Du 等^[13]报道了基于机器学习技术的 81 路激光的相干合成,锁相残差为 $\sim\lambda/18$;同年, Shpakovych 等^[14]报道了基于准强化学习技术的 100 束激光的相干合成,锁相残差为 $\sim\lambda/30$;2022年, Chang 等^[15]基于二维光场计算成功实现了 397 束阵元的相干控制,强噪声下实现了低于 $\lambda/31$ 的锁相残差,这是目前报道的最大阵元的活塞相位控制系统。

最近,基于超大阵元激光阵列生成、高速并行相位计算与控制等技术,国防科技大学进一步实现了 2000 Hz 闭环控制带宽下的阵元拓展,将控制单元数提升至 1000 路以上。如图 1(a) 所示,在含有 1027 个阵元的光

纤激光阵列结构中,中心波长为 1064 nm 的单频种子光经过准直 (CO) 扩束 (BE) 后注入到光学分束器 (BS) 中,分束后的反射光为参考光,透射光为主激光。利用空间光调制器 1 (SLM1) 对主激光进行调制,生成图 1(b) 所示的含有 1027 个阵元的光纤激光阵列,并对全部阵元进行相位调制,以 200 Hz 的刷新频率施加相位噪声,相位噪声是随机数发生器产生的均匀分布于 $[0, 2\pi)$ 区间的伪随机数组。阵列的外接圆直径为 ~ 8.856 mm, 单光束的直径为 ~ 0.216 mm, 相邻光束的中心间距为 ~ 0.24 mm, 系统占空比为 $\sim 90\%$ 。参考光在经过一个半波片 (HWP) 和偏振片 (P) 后,与主激光通过另一个 BS 发生干涉,形成的干涉条纹如图 1(c) 所示。高速相机与计算机构成相位计算系统,计算得出每束激光的相位并将其施加给空间光调制器 2 (SLM2), SLM2 负责对每一束激光的相位噪声进行实时校正。SLM1 和 SLM2、SLM2 和高速相机之间的 4 个透镜 (L) 构成两组 $4f$ 系统,用于保证三个器件靶面的光学共轭性。通过两个 BS、光电探测器 (PD) 和光斑采集相机 (CCD) 测量合成光斑焦平面的桶中功率与光强信息。图 1(d) 为开环状态下 PD 测量得到的归一化光强,通过记录直径为 $100 \mu\text{m}$ 的采样小孔内的桶中功率的起伏,计算得到归一化标准差为 0.34。图 1(e) 为闭环状态下 PD 测量得到的归一化光强,与开环相比,小孔内的功率提升了 107.8 倍,归一化标准差下降为 0.029。根据 CCD 记录的数据,进行了 10 s 长曝光叠加,开环和闭环时的光斑分别如图 1(f)、(g) 所示。与开环相比,合成光斑中央主瓣能量的集中度得到显著提升。通过计算,图 1(b) 所示外接圆的艾里斑直径为 $88 \mu\text{m}$, 对应的闭环条件下的桶中功率占比为 53.5% (理论计算值为 56.6%), 活塞相位的锁相残差优于 $\lambda/27$ 。该实验进一步提高了光纤激光阵列相干合成的路数,为超大阵元数目光纤激光相干合成系统的研制提供了技术支持。

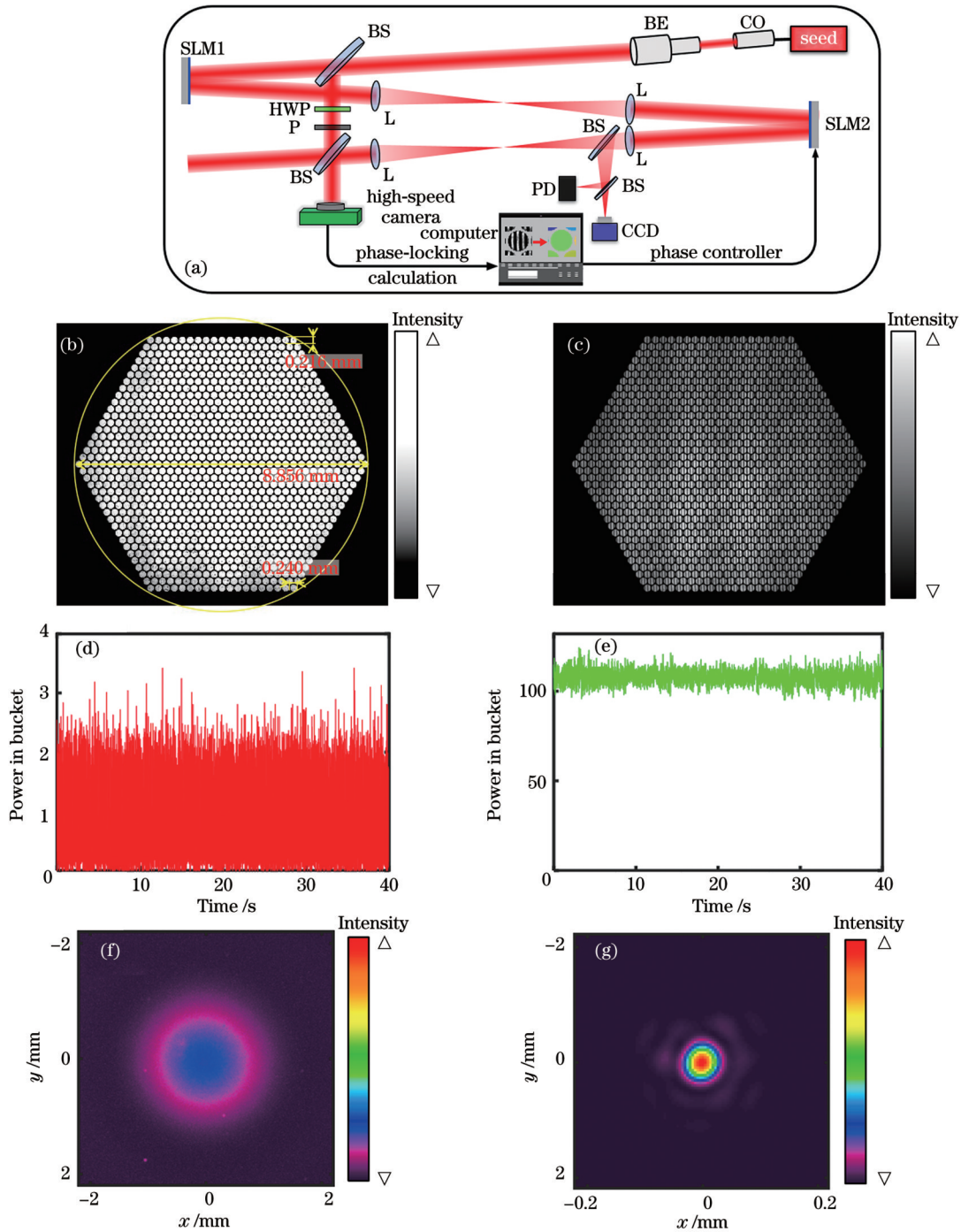


图 1 实验结构图与典型结果。(a) 实验结构示意图; (b) 高速相机记录的激光阵列强度图; (c) 高速相机记录的干涉条纹图样; (d) 开环状态下的桶中功率; (e) 闭环状态下的桶中功率; (f) 开环状态下的 10 s 长曝光光斑; (g) 闭环状态下的 10 s 长曝光光斑
 Fig. 1 Experimental structure diagram and typical results. (a) Experimental structure diagram; (b) laser array intensity map recorded by high speed camera; (c) interference fringe pattern recorded by high speed camera; (d) power in bucket in open-loop state; (e) power in bucket in close-loop state; (f) 10 s long-exposure pattern in open-loop state; (g) 10 s long-exposure pattern in close-loop state

常琦¹, 高志强¹, 邓宇¹, 任帅^{1,4}, 马鹏飞^{1,2,3*}, 粟荣涛^{1,2,3}, 马闰星^{1,2,3}, 周朴^{1**}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

³脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南长沙 410073;

⁴国防科技大学信息通信学院, 湖北武汉 430035

通信作者: *shandapengfei@126.com; **zhoupu203@163.com

收稿日期: 2022-12-19; 修回日期: 2023-01-17; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-02-18

参 考 文 献

- [1] Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 951-953.
- [2] Flores A, Ehrereich T, Holten R, et al. Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 97281Y.
- [3] 刘泽金, 周朴, 马鹏飞, 等. 4路高功率窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成实现 5 kW 级高亮度激光输出[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0415004.
Liu Z J, Zhou P, Ma P F, et al. Coherent polarization synthesis of four high-power narrow-linewidth, linearly polarized fiber amplifiers to achieve 5 kW high-brightness laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0415004.
- [4] Ma P F, Chang H X, Ma Y X, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107016.
- [5] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [6] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126021.
- [7] 吴坚, 马阎星, 马鹏飞, 等. 光纤激光相干合成 20 kW 级高功率输出[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(9): 20210621.
Wu J, Ma Y X, Ma P F, et al. Coherent synthesis of 20 kW high power output by fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210621.
- [8] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [9] Chang H X, Xi J C, Su R T, et al. Efficient phase-locking of 60 fiber lasers by stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(10): 101403.
- [10] Fsaifes I, Daniault L, Heilmann A, et al. Coherent beam combining of 37 femtosecond fiber amplifiers[C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [11] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [12] Chang H X, Chang Q, Xi J C, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [13] Du Q, Wang D, Zhou T, et al. 81-beam coherent combination using a programmable array generator[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5407-5418.
- [14] Shpakovych M, Maulion G, Kermene V, et al. Experimental phase control of a 100 laser beam array with quasi-reinforcement learning of a neural network in an error reduction loop[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12307-12318.
- [15] Chang Q, Hou T Y, Long J H, et al. Experimental phase stabilization of a 397-channel laser beam array via image processing in dynamic noise environment[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(19): 6542-6547.