科学通报 2026 年 第 71 卷 第 17 期: 3847 ~ 3848
科技前沿
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

面向工业诊断的高能纳秒脉冲串激光器

袁峰[1,2], 樊仲维[2], 邱基斯[1*], 刘昊[1], 陈艳中[1], 齐耀东[1,2], 王昊成[1], 刘悦亮[1]

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094
2. 中国科学院大学, 北京 101408
* 联系人, E-mail: qiujs@aircas.ac.cn

A high-energy nanosecond burst-mode laser for industrial diagnostic

Feng Yuan[1,2], Zhong-Wei Fan[2], Ji-Si Qiu[1*], Hao Liu[1], Yan-Zhong Chen[1], Yao-Dong Qi[1,2], Hao-Cheng Wang[1] & Yue-Liang Liu[1]

[1] *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*
[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China*
* Corresponding author, E-mail: qiujs@aircas.ac.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0275

在高温高压湍流燃烧研究装置中开展超高帧频激光诊断时, 光源通常需要在较强的辐射背景与散射环境下提供足够的照明与激发强度, 并具备较高的时间采样能力[1]. 受限于热负荷与工作模式, 现有的高重复频率激光器多为毫焦量级脉冲能量[2], 难以满足高压燃烧场的单发成像需求, 而焦耳量级纳秒激光器难以满足kHz级超高帧频诊断的连续时间序列采样[3]. 为兼顾两者, 我们研制了一套高能纳秒脉冲串绿光激光器, 采用脉冲串输出方式, 在10 ms时间窗内以10 kHz重复频率输出100发脉冲, 单脉冲能量600 mJ, 脉冲宽度30.7 ns, 指标达到国内领先水平. 该光源可用于PIV(Particle Image Velocimetry)、PLIF(Planar Laser-Induced Fluorescence)等超高帧频激光诊断的照明与激发. 围绕脉冲串内外能量稳定性、光束质量及连续运行可靠性等指标, 本文给出系统测试结果与应用验证, 为高温高压湍流燃烧过程的高时间分辨率测量提供光源基础.

该激光器采用"可调谐光纤种子源+前置放大单元+功率放大单元"的MOPA(master oscillator power-amplifier)技术路线实现高能量基频输出, 再通过LBO(LiB_3O_5)实现倍频532 nm激光输出, 光学原理如图1所示. 种子源为调Q光纤激光器, 为脉冲串模式输出, 使用声光调制器AOM(acoustic optical modulator)作为时间快门控制模块, 用于脉冲串窗口选择, 其控制信号与脉冲串触发同步, 确保仅在设定窗口内允许种子注入放大链路. 输出脉宽为30 ns, 重复频率为10 kHz, 脉冲串持续时间为10 ms. μJ量级的种子光经过两级隔离器和透镜1-2组成的扩束透镜组进入前置放大系统. 经过4 mm口径侧泵棒状放大器1实现双通放大, 获得1 mJ能量输出; 完成第一级放大后, 经过透镜3、透镜4、小孔组成的空间滤波系统整形, 再经过两级隔离器, 进入5 mm口径侧泵棒状放大器2实现单程放大, 能量输出5 mJ; 进入6 mm口径侧泵棒状放大器3和4进行双程放大, 能量放大至80 mJ, 由透镜5-6进行扩束后进入10 mm口径侧泵棒状放大器5和12 mm口径侧泵棒状放大器6进行串接单程放大, 将能量放大至1.2 J, 见图2(a); 在频率变换阶段, 基频光首先经过透镜7-8进行口径变换, 缩束准直后进入半温度半角度调控的LBO倍频晶体进行二次谐波变换, 倍频光与基频光在二向色镜处分离, 最终获得单脉冲能量613 mJ、重复频率10 kHz、脉冲宽度30.7 ns的532 nm激光输出, 见图2(b)~(d); 倍频转换效率达到51%以上, 光斑大小6.5 mm, 光束质量M_x^2=1.87, M_y^2=1.83, 见图2(e)和(f).

高能脉冲串激光器工程化长期受制于两类矛盾: 一方面需要提供足够的光强, 另一方面又必须具备高时间采样能力, 并在连续实验中保持输出一致性. 针对上述难题, 我们围绕包络整形和能量一致性开展了关键技术创新. 针对多级放大链路固有的增益饱和与热-机耦合导致的时域波形畸变, 建立了"放大器增益动态响应—脉冲串能量抽运—输出包络"耦合

引用格式: 袁峰, 樊仲维, 邱基斯, 等. 面向工业诊断的高能纳秒脉冲串激光器. 科学通报, 2026, 71: 3847–3848
Yuan F, Fan Z-W, Qiu J-S, et al. A high-energy nanosecond burst-mode laser for industrial diagnostic (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3847–3848, doi: 10.1360/CSB-2026-0275

© 2026《中国科学》杂志社

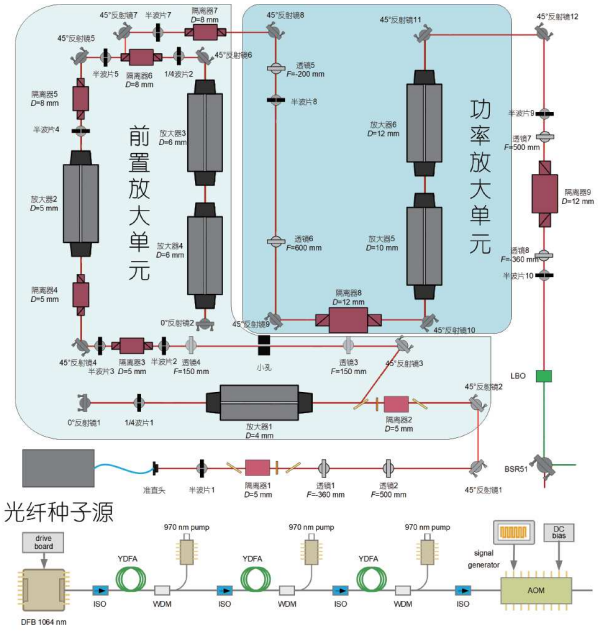


图 1 激光器装置光学原理图

Figure 1 Optical schematic diagram of the laser setup

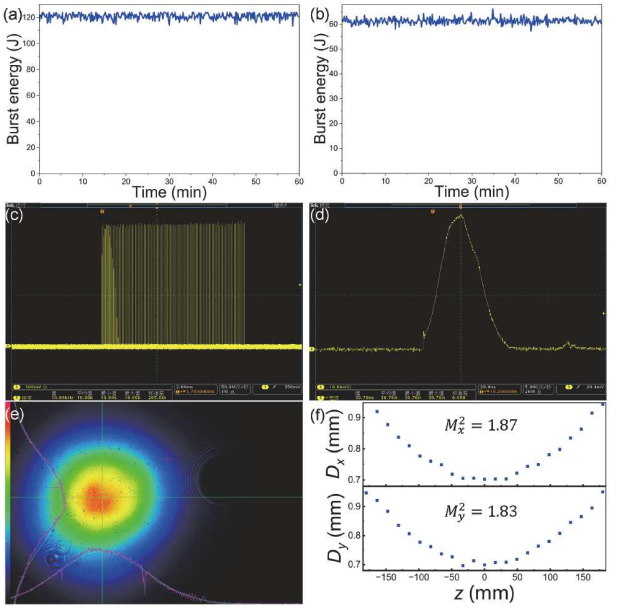


图 2 测试结果. (a) 基频1064 nm脉冲串能量(包含100个子脉冲); (b) 倍频532 nm脉冲串能量(包含100个子脉冲); (c) 重复频率; (d) 脉宽; (e) 光斑模式; (f) M^2因子

Figure 2 Test results. (a) 1064 nm burst energy (including 100 sub-pulses); (b) 532 nm burst energy (including 100 sub-pulses); (c) repetition rate; (d) pulse duration; (e) beam profile; (f) M^2 factor

模型，采用种子预补偿的主动整形策略，首先根据目标平顶包络设定脉冲串参数，并生成初始种子驱动波形；随后经多级放大后对输出脉冲串进行测量，提取各子脉冲能量分布，并与目标包络进行比较；根据误差使用贝叶斯优化算法对种子端预补偿参数进行更新，经过多轮离线人工迭代后使输出包络逐步逼近平顶目标，最终提升脉冲串内各子脉冲的能量一致性. 该方法显著提升了脉冲串子脉冲能量一致性，由11.31%提升至1.86%，为超高帧频诊断提供了可靠的时间采样基础, 显著提升了高温高压湍流燃烧非定常结构(火焰面起伏、涡旋演化、混合分布等)测量结果的可重复性与可比性.

该脉冲串激光光源以“包络可控、能量一致”为核心特征，在强背景、强散射的苛刻燃烧环境下实现了高能量、高采样率与高稳定性兼顾，为高温高压湍流燃烧的超高帧频激光诊断提供了关键支撑.

参考文献

1 Chterev I, Rock N, Ek H, et al. Simultaneous imaging of fuel, OH, and three component velocity fields in high pressure, liquid fueled, swirl stabilized flames at 5 kHz. Combust Flame, 2017, 186: 150–165

2 Ran Z H, Zhao Y M, Li J, et al. Research progress of all-solid-state high-repetition-rate electro-optic Q-switched lasers (in Chinese). Telecontrol Telemet, 2021, 42: 1–12 [冉子涵, 赵一鸣, 李静, 等. 全固态高重频电光调Q激光器研究进展. 遥测遥控, 2021, 42: 1–12]

3 Wang C, Wei H, Zhou L, et al. A 10 Hz, 1.2 J nanosecond Nd:YAG laser with a near square pulse waveform (in Chinese). Chin J Lasers, 2017, 44: 66–72 [汪超, 韦辉, 周丽, 等. 10 Hz, 1.2 J脉冲波形近方波的纳秒Nd:YAG激光器. 中国激光, 2017, 44: 66–72]