



·研究快讯·

高功率激光装置实现 CBET 研究所需的四色光输出

张 锐, 周丹丹, 田小程, 周 维, 党 钊, 姚 轲, 赵军普, 柴向旭, 黄小霞,
黄智蒙, 李 平, 冯 斌, 彭志涛, 胡东霞, 朱启华, 郑万国

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

中图分类号: TN242

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220381

Four-color laser for crossed-beam energy transfer research realized on high power laser facility

Zhang Rui, Zhou Dandan, Tian Xiaocheng, Zhou Wei, Dang Zhao, Yao Ke, Zhao Junpu, Chai Xiangxu,
Huang Xiaoxia, Huang Zhimeng, Li Ping, Feng Bin, Peng Zhitao, Hu Dongxia, Zhu Qihua, Zheng Wanguo
(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

2021 年 8 月美国 NIF 实现了 1.3 MJ 聚变放能的里程碑, 其中, 交叉光束能量转移(CBET)是实现该放能的关键要素之一。利用 CBET 可补偿黑腔腰部驱动、缓解外环背散压力, 从而改善黑腔内的驱动对称性, 因此掌握和应用 CBET 技术具有重要意义。国际上目前仅美国开展了 CBET 所需的四色激光打靶技术研究, 国内尚未开展实验研究。在高功率固体激光装置上实现四色光打靶需要解决四色激光产生、传输、放大、幅频效应抑制和高效三倍频等问题。近期, 中物院激光聚变研究中心激光技术研究团队通过重构前端系统架构、抑制多色激光工作下的幅频效应、改进主放宽光谱下的增益模型、对三倍频晶体匹配角进行波长跟随等实现了激光装置四色光输出。形成的四色光打靶能力已成功应用于交叉光束能量转移实验研究。

根据 CBET 对四色光波长分布和精密调控需求, 重构了前端系统配置架构, 提出了基于四色振荡器、四个时分复用通道的四色前端和光纤配色方案, 解决了激光装置四色光四环分布且各环波长独立可调的难题, 实现了四色激光各路脉冲同步抖动优于 1.1 ps 的高精度同步输出, 四色前端系统光路示意图如图 1 所示。在预放大系统内通过对易产生标准具效应的元件楔化设计和基于石英晶体的双折射效应补偿技术, 消除和补偿了标准具效应和增益窄化引起的光谱畸变, 获得了 $1053 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ 平坦光谱区域, 如图 2 所示, 从而满足了四色小宽带调频脉冲传输放大时幅频效应抑制的需求。

主放大系统为多程放大构型, 按腔内放大器 9 片钽玻璃、助推放大器 7 片钽玻璃配置计算, 总增益长度约为 272 cm, 因此小信号增益系数随光谱的变化不容忽略。图 3 为根据受激发射截面计算的钽玻璃增益谱, 在峰值增益波长两侧呈非对称下降趋势。图 4 为计算得到的不同波长下 3 ns 脉宽激光注入时的输出曲线。以 200 mJ 注入能量为例, 1054 nm 相比 1053 nm 输出能量减少 5%; 1052 nm 相比 1053 nm 输出能量减少 24%。该仿真计算结果为主放大系统在四色光工作下输出能量的精密控制提供了依据。

激光装置三倍频过程采用了“I+II”两块 KDP 晶体级联方式获得三倍频光输出。高效频率转换必须满足严格的相位匹配条件。研究发现晶体匹配角是波长的函数, 标定结果表明, 基频波长每增加 1 nm, 二倍频晶体匹配角增加 $35 \mu\text{rad}$, 三倍频晶体匹配角减小 $1110 \mu\text{rad}$, 如图 5 所示。其中三倍频晶体角度对波长变化敏感, 是影响高效三倍频的主要因素, 如图 6 所示。通过研究, 在四色光打靶中基于晶体角度动态补偿技术, 实现了四色光工作下晶体角度的最佳匹配和高效三倍频输出。

在上述研究基础上, 完成了高功率激光装置四色光输出能力构建。经测试, 四色光输出指标满足物理实验需

* 收稿日期: 2022-11-08; 修订日期: 2022-12-01
基金项目: 国家自然科学基金项目 (62075201)
联系方式: 张 锐, zhangrui8s-1@caep.cn。
通信作者: 胡东霞, dongxia.hu@163.com。

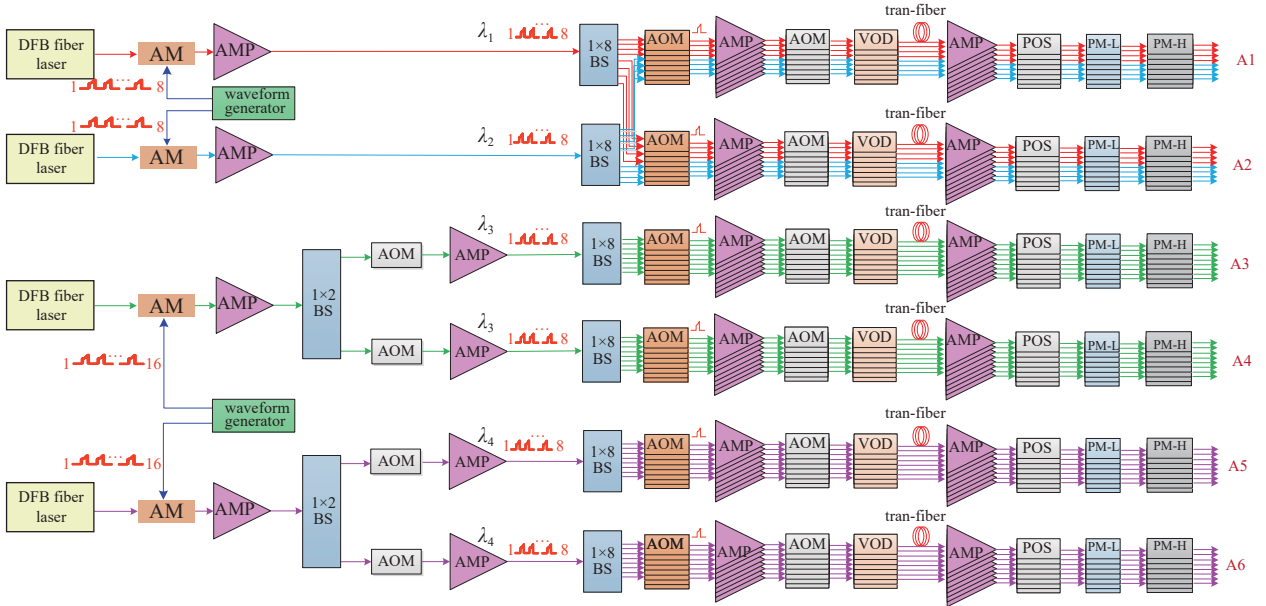


图 1 四色前端系统光路示意图

求：激光波长分四环分布，每环独立可调，环内同色；内环两色，中心波长覆盖 1053.0~1053.5 nm；外环两色，中心波长覆盖 1052.5~1053.0 nm；全部光束具备调为 1053 nm 同色的能力。形成的四色光打靶能力为开展多种类型 CBET 研究创造了条件，已成功应用于物理实验。测试数据表明，通过 CBET 将外环光向内环光能量转移效果明显，从而有效规避了内环驱动不足的风险，拓展了高功率激光装置的物理实验能力。

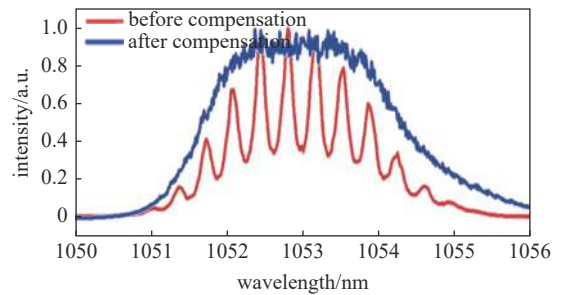


图 2 再生放大器补偿前后的光谱透过率曲线

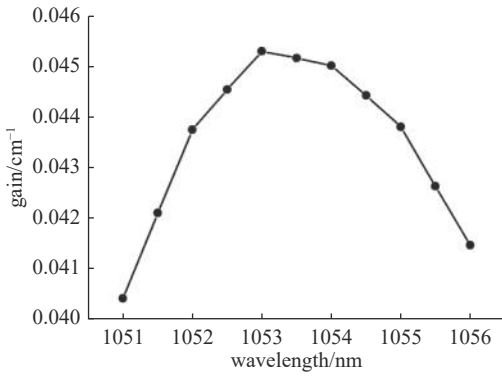


图 3 主放大系统钕玻璃增益谱

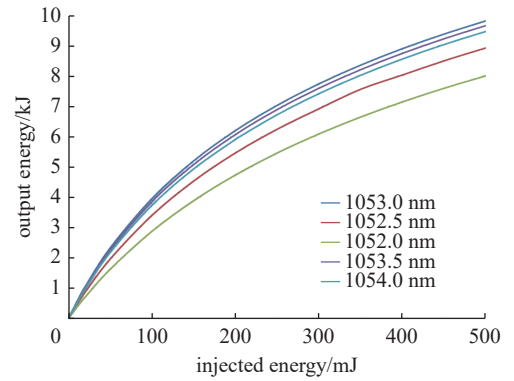


图 4 理论模拟得到的主放大系统注入输出曲线

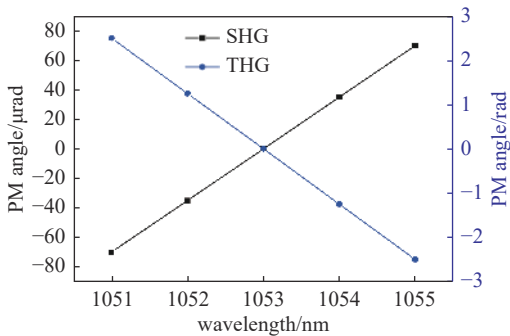


图 5 倍频晶体匹配角与激光波长关系曲线

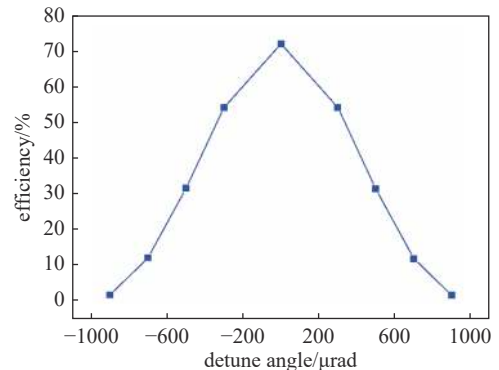


图 6 三倍频效率与三倍频晶体失谐角关系曲线