

基于 Gires-Tournois 干涉腔实现短脉冲时域相干合成

基于光纤激光相干放大网络的高能高功率激光驱动器是未来重要的发展方向,具有广阔的应用前景。相干合成在高功率光纤飞秒光学频率梳、非线性脉冲压缩以及阿秒光学等领域中有潜在的应用价值。短脉冲相干合成技术总体上分为空域、频域以及时域相干合成技术。其中,时域相干合成的技术路线主要有三种,分别是脉冲分割-放大、增强腔与脉冲相干堆积技术。2023年德国耶拿大学利用多维合成技术(16路空域与8个脉冲分割-放大时域相干合成),实现了单脉冲能量为32 mJ的超快光纤激光输出。

基于 Gires-Tournois 干涉(GTI)腔的脉冲相干堆积属于时域相干合成技术的一种,具有可控自由度多、堆积脉冲数目多、合成效率高、结构紧凑等优点,已经在多脉冲时域相干合成系统中得到应用。2021年美国密歇根大学利用4+4 GTI腔和双循环稳定优化控制算法,将81个脉冲的相干堆积效率提高到70.5%,这也是多脉冲时域相干合成效率的最高纪录。国内关于GTI腔的脉冲相干堆积技术的研究鲜有报道,与国外存在一定差距。

在时域相干合成中,传统的随机并行梯度下降(SPGD)算法易陷入局部极值,无法保证全局最优解。近期,课题组在对SPGD算法的动态控制(加入光腔相位噪声)进行模拟仿真的基础上,对算法进行了改进和优化,提出了扰动幅度 ϵ 指数匀滑的策略,并攻克了脉冲相位预设、相位与幅度波形精密同步、脉冲峰值检测、光腔相位主动控制等关键技术,利用GTI腔和优化控制算法,实验实现了三脉冲时域相干合成。

实验系统如图1所示,单频连续光纤种子激光(波长为1064 nm,线宽为10 kHz)经过幅度调制器(AM)后,产生重复频率为50 MHz的脉冲串,每个脉冲串由脉宽为1 ns、间隔为500 MHz的三个脉冲组成,经过放大器(Amp1)、相位调制器(PM)和声光调制器(AOM)后,脉冲串间的重复频率降为10 MHz,再通过两级光纤放大器(Amp2和Amp3)后准直输出,平均功率约为100 mW。输出光束经过全反镜 M_1 与 M_2 后,入射到单个GTI腔,该环形腔的腔长为0.6 m,对应脉冲间隔为2 ns。

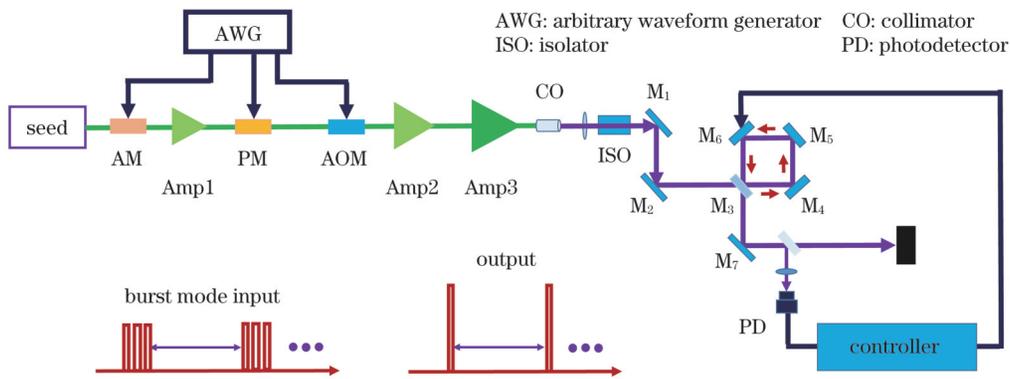


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

对于第一个脉冲,脉冲到达反射率为 $R=50\%$ 的反射镜 M_3 时,一部分光反射输出,另一部分光进入腔内,腔镜 M_4 、 M_5 和 M_6 均为全反镜。对于第二个脉冲,该脉冲与腔内的脉冲同时到达反射镜 M_3 ,两个脉冲在此发生相干相消,此时输出脉冲振幅为0,脉冲能量被堆积到腔内。当第三个脉冲到达反射镜 M_3 时,与腔内脉冲发生相干相长,所有能量输出腔外。部分输出光束经过取样后,进入高速光电探测器(带宽为10 GHz),通过控制器(controller)对压电陶瓷驱动的

偏摆镜 M_6 进行光腔相位的主动控制,最后实现了三脉冲的相干合成。

图2(a)所示为三脉冲的相位预设。图2(b)所示为开环情况(即不加相位预设与腔相位控制)下三脉冲的堆积单周期波形。图2(c)所示为只施加相位预设时的堆积波形,在第三个脉冲处初步实现了堆叠,但峰值没有达到最大,并且随着光腔相位的变化而随机波动。如图2(d)所示,同时施加相位预设与光腔相位控制后,获得了稳定的相干堆积,合成后主、副脉冲峰值

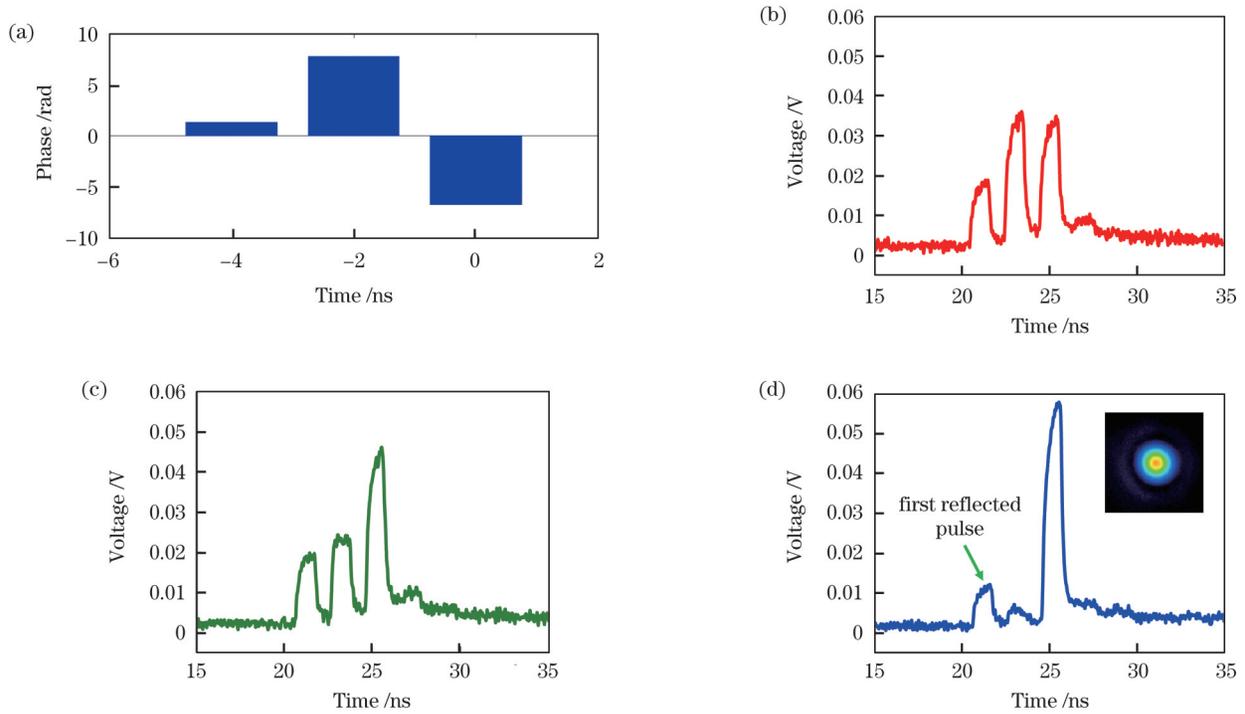


图 2 三脉冲相干堆积的输出特性。(a)预设相位;(b)开环堆积波形;(c)相位预设后的堆积波形;(d)相位预设与闭环后的堆积波形
 Fig. 2 Output characteristics of coherent stacking of three pulses. (a) Predefined phases; (b) stacking waveform in open loop; (c) stacking waveform after predefining phases; (d) stacking waveform after predefining phases in closed loop

比达到 6.95:1(抛掉第一个脉冲反射部分),平均功率为 95 mW,输出光束质量因子为 $M^2=1.25$ 。未来,随着合成脉冲数目的增多,控制参量将持续增加,合成效

率会有所下降,甚至会陷入局部极值,因此需要进一步优化算法控制速度并提高全局寻优能力,使得 GTI 腔具有合成更多脉冲的潜力。

黄智蒙^{1*}, 耿东颀^{2**}, 刘必达¹, 周丹丹¹, 张帆¹, 张锐¹, 彭志涛¹, 朱启华¹, 胡东霞¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²四川省分析测试服务中心, 四川 成都 610066

通信作者: *huangzhimeng@caep.cn; **geng0909@126.com

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-03-05; 录用日期: 2024-03-20; 网络首发日期: 2024-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(62075201)