

激光与光电子学进展

高功率脉冲合束光纤激光器的研究

谭小妹*, 刘赞, 李文涛

上海飞博激光科技有限公司, 上海 201821

摘要 高功率脉冲激光器在精密焊接和激光清洗等领域具有重要应用, 脉冲合束能够实现对多路脉冲峰值功率的叠加, 而脉冲同步精度很大程度上决定了合束脉冲的性能。为此, 提出了一种基于程控时间调制电路的脉冲同步方法, 最大时间延迟为 256 ns, 同步精度小于 1 ns。采用该同步方法实现了 3 台独立激光光子模块的非相干合束, 合束效率达 97%。当同步误差 ≤ 4 ns 时, 脉冲重复频率和半高全宽在 40~1000 kHz、19~660 ns 范围内灵活可调。

关键词 激光器; 光纤激光器; 非相干合束; 脉冲时间同步; 同步误差

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1136001

Research on High Power Pulse Combined Fiber Laser

Tan Xiaomei*, Liu Yun, Li Wentao

Shanghai Feibo Laser Technologies Co., Ltd., Shanghai 201821, China

Abstract High power pulse laser has important applications in precision welding and laser cleaning. Peak power increasing can be realized by beam combining of multiple pulse lasers, and the pulse synchronization accuracy significantly determines the performance of the beam combination laser. Therefore, we propose a pulse synchronization method based on programmable time modulation circuit with a maximum time delay of 256 ns and a resolution of less than 1 ns. It has been proved that the incoherent beam combination with 97% efficiency can be achieved by using this method for three independent sub-module lasers. When the synchronization is error less than or equal to 4 ns, the pulse repetition frequency and full width at half maximum can be adjusted in the range of 40–1000 kHz and 19–660 ns.

Key words lasers; fiber laser; incoherent combining; pulse time synchronization; synchronizing error

1 引 言

高功率脉冲激光器具有准、快、热效应小等优点, 广泛应用于工业领域^[1-2]。单路脉冲激光器一般采用多级放大结构, 如创鑫激光推出的 500 W 30 mJ 激光器, 采用了芯径 220 μm 的增益光纤。为了突破单根增益光纤的非线性效应、光学损伤等限制, 获取更高功率输出, 脉冲合束技术^[3-6]应运而生。相比连续激光合束, 除了实现多光束会聚为一束, 脉冲合束的关键在于保证各路脉冲的时

间同步性。针对光纤激光器, 传统的脉冲同步方法是: 引入光纤延时线, 控制光纤切割、熔接等工艺, 来调整光程差使得各路激光的光程相等, 实现脉冲同时到达目标点的目的。比如, 2012 年国防科技大学王小林等^[7]人通过光纤切割、熔接和空间光路调节的方式, 将脉宽为 20 μs 的两路激光光程差控制在 0.05 m 以下, 获得了同步误差小于 8.3×10^{-6} s 的两束脉冲激光合束。但是, 通过引入光纤延时线的方法实现脉冲同步存在诸多瓶颈, 如: 制造工艺反复, 且同步误差依赖于设备精度, 而高精

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-02-17; 录用日期: 2022-03-25

通信作者: *36078376@qq.com

度的切割、熔接设备需要高昂的费用;另外,相比低功率通信系统,在高功率激光器中引入长光纤会增加非线性的积累,从而影响激光器性能及安全。

为了突破上述瓶颈,本课题组采用的程控时间调制同步方法避免了引入长光纤而增加非线性的积累。另一方面,为了满足精密加工的需求,IPG公司推出的脉冲激光器,脉宽和频率在 20~100 ns, 2~50 kHz 范围内可调,可根据加工材料、厚度等因素调节所需激光参数。为了获得更宽的参数调节范围,本课题组选用基于主振荡功率放大(MOPA)结构的脉冲激光器作为合束子模块,实现了频率和半高全宽在 40~1000 kHz, 19~660 ns 范围内可调。

2 实验原理及结果分析

实验中,通过基于现场可编程门阵列(FPGA)设计的控制器来实现光脉冲同步,利用FPGA内部锁相环(PLL)采用任意分频算法产生指定频率及占空比的同步信号。如图1所示,同步信号分3路进入时间调制电路;根据光纤放大器引入的光脉冲时间差,时间调制电路通过程序配置对同步信号产生延时;各激光模块的驱动电路将延时后的同步信号作为触发信号,产生电脉冲去驱动种子激光二极管出射光脉冲;光脉冲进入相应的光纤放大器。因此,时间调制电路产生的时延补偿了光程差引起的光学时延,同步后的光脉冲经合束器进行光束聚合,实现脉冲功率及能量的叠加。

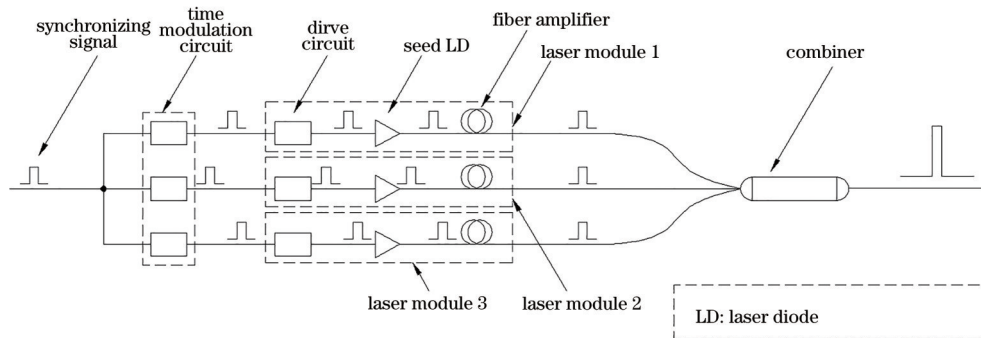


图1 高功率脉冲合束光纤激光器实验原理图

Fig. 1 Schematic for high power pulse combined fiber laser

2.1 时间同步精度和同步范围的测试

每一路时间调制电路由4个程控延时线串联构建,延时线参数由编程控制。实验中,设置延时线的分辨率小于1 ns,可编程增量64级,则每一路时间调制电路可实现256 ns的时间延迟,同时保证小于1 ns的时间分辨率。因此,选择更小分辨率的延

时线即可提高脉冲同步精度;而选择可编程增量级数更多的延时线,或增加延时线串联个数可以扩大脉冲同步范围。如图2(a)所示,通道1和2的电脉冲相差957.1 ps,该值反映了电路分辨率,即同步精度 <1 ns。图2(b)为最大时间延迟量的测试波形,即该电路的最大同步范围为256 ns。综上所述,通

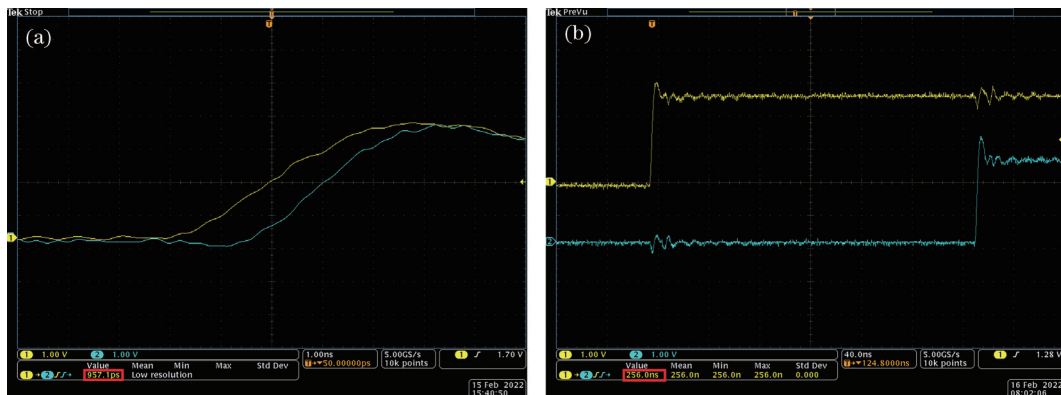


图2 时间调制电路的测试波形。(a)分辨率;(b)最大时间延迟量

Fig. 2 Test waveform for time modulation circuit. (a) Resolution; (b) maximum time delay

过搭配多个不同分辨率及可编程增量级数的延时线,可对脉冲的时间差进行粗调和细调,实现更大的延时范围和更高的时间分辨率,以此提高同步范围和精度。

2.2 同步误差的测试

子模块 P5001、P5002、P5003 分别采用了长度为 5 m、5 m、4 m 的 50 μm /400 μm 掺镱光纤,平均功率为 218 W、218 W、205 W。采用 3 \times 1 信号合束器(入纤直径为 50 μm /400 μm ,出纤直径为 200 μm /220 μm /360 μm)对同步后的子模块进行合束,平均功率达 622 W。图 3(a)为子模块在同步信号下的光脉冲,底宽为 25.6 ns、27.2 ns、26.4 ns,峰值功率为 10.8 kW、11.2 kW、11.4 kW。由于电子器件差异和光程差共同引入脉冲延时,在同步信号的作用下,各路脉冲时间差为 195.2 ns(P5001 与 P5003)和

123.2 ns(P5002 与 P5003)。假如采用光纤延时线来补偿上述时间差,根据式(1)可粗略估算出:分别给 P5001 和 P5002 增加 39.04 m 和 24.64 m 光纤,可依次将光脉冲延时 195.2 ns 和 123.2 ns,从而与 P5003 的脉冲同步。

$$L = \frac{\delta \times c}{n}, \quad (1)$$

式中: L 为光纤长度; δ 为脉冲时间差; c 为光速; n 为光纤折射率。显然,引入长光纤会增加非线性的积累,并且通过光纤切割、熔接难以控制同步误差。因此,本文采用程控时间调制脉冲同步技术,图 3(b)是脉冲基本同步时的合束光脉冲波形,脉冲底宽为 31.2 ns,其中单路脉冲的最大底宽为 27.2 ns,则同步误差 ≤ 4 ns。合束脉冲的峰值功率达 32.6 kW,合束效率为 97%。

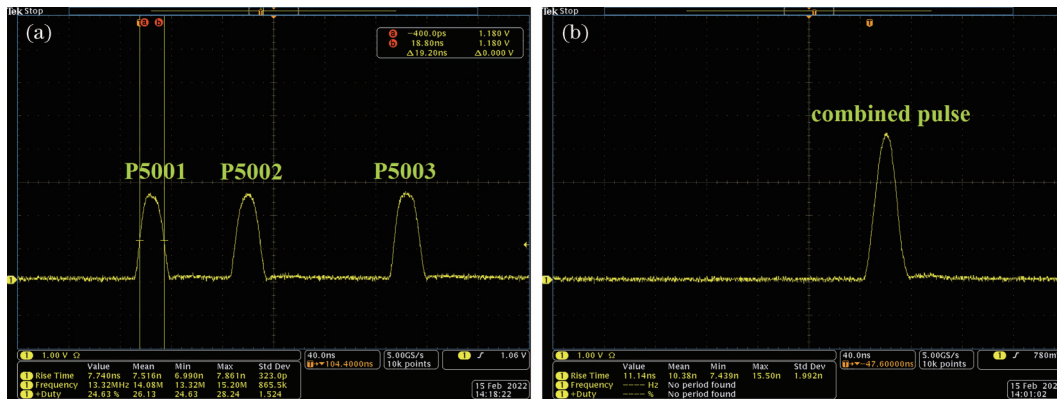


图 3 时域波形。(a)3路激光模块在同步信号下的光脉冲;(b)脉冲同步时的合束脉冲光波形

Fig. 3 Time domain waveform. (a) Optical pulse for 3 individual lasers at synchronizing signal; (b) combined pulse light waveform with pulse synchronization

2.3 非线性抑制能力的评估

为了评估激光器的非线性抑制能力,对输出

622 W、40 kHz 下的脉冲光谱进行分析。图 4(a)是合束脉冲的光谱图,能量集中在(1062.7 \pm 20) nm,

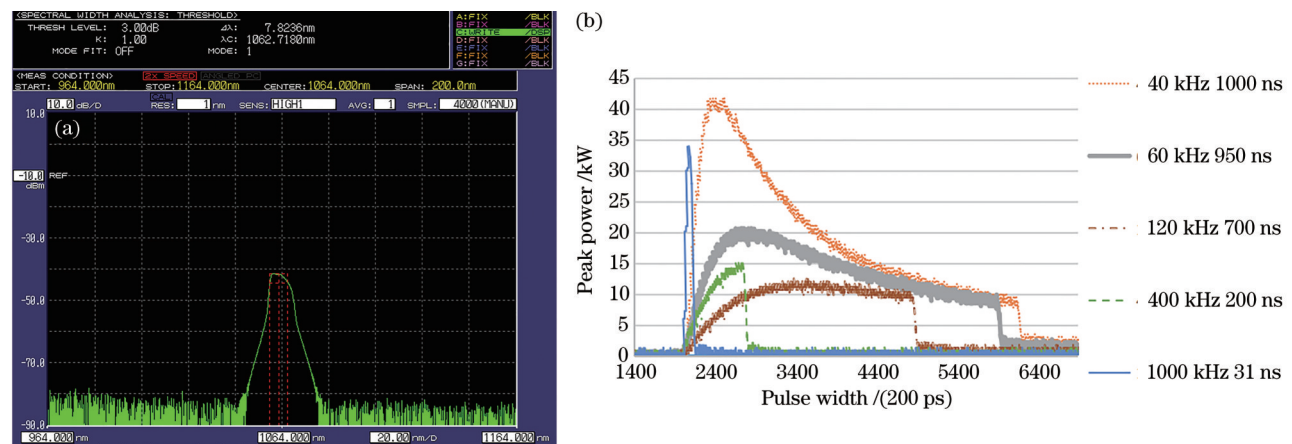


图 4 合束激光器输出特性。(a)光谱图;(b)不同频率和脉宽的脉冲波形

Fig. 4 Output characteristics of combined laser. (a) Spectrum; (b) pulse waveform at different frequencies and pulse widths

信噪比(SNR) >40 dB,没有受激拉曼散射(SRS)等非线性效应产生。这是由于采用了程控时间调制的脉冲同步方法,避免了通过引入光纤延时线而增加非线性的积累。图 4(b)给出了频率 40~1000 kHz、半高全宽 19~660 ns 范围内的脉冲波形,可依据具体应用需求灵活选择激光器参数。

3 结论

本文提出了一种应用于脉冲合束的基于程控时间调制的脉冲同步技术,能将脉冲时间相差 256 ns 内的多路脉冲实现同步精度小于 1 ns 的脉冲同步。相比通过引入光纤延时线的同步方法,该同步技术可有效避免高功率系统中的非线性效应及光学损伤^[8]。结合非相干合束技术,实现了合束效率达 97% 的 3 台 MOPA 激光光子模块的脉冲合束,具有脉冲重复频率、脉宽等参数调节范围大的优点。进一步优化激光器输出特性,实现更高功率、更大能量、更佳同步精度和更宽同步范围的脉冲合束技术,这是本课题组下一步工作的重要研究内容之一。

参 考 文 献

- [1] Li W X, Hao Q, Yan M, et al. Tunable flat-top nanosecond fiber laser oscillator and 280 W average power nanosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 10113-10118.
- [2] 廖嘉宁,王欣达,周兴汶,等.铜纳米颗粒的飞秒激光连接过程研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(8): 0802008.
Liao J N, Wang X D, Zhou X W, et al. Joining process of copper nanoparticles with femtosecond laser irradiation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(8): 0802008.
- [3] Bagayev S N, Trunov V I, Pestryakov E V, et al. High-intensity femtosecond laser systems based on coherent combining of optical fields[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2013, 115(3): 311-319.
- [4] Bashinov A V, Gonoskov A A, Kim A V, et al. New horizons for extreme light physics with mega-science project XCELS[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2014, 223(6): 1105-1112.
- [5] Schmidt O, Wirth C, Nodop D, et al. Spectral beam combination of fiber amplified ns-pulses by means of interference filters[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22974-22982.
- [6] 张森.高能短脉冲激光相干合成关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2018:27-29.
Zhang S. Research on key technologies of coherent combination for high-energy short pulse lasers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 27-29.
- [7] 王小林,周朴,马阎星,等.基于主动相位控制的脉冲激光相干合成技术[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(1): 33-37.
Wang X L, Zhou P, Ma Y X, et al. Investigation of coherent beam combining pulsed fiber lasers with active phase control[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(1): 33-37.
- [8] 赫崇君,李伟立,王吉明,等.铜掺杂钽酸锂单晶的生长及光学性能[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0116003.
He C J, Li W L, Wang J M, et al. Growth and optical properties of lithium tantalate single crystals doped with indium and neodymium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0116003.