

多束超短脉冲束间同步诊断技术研究

王 杨¹ 朱宝强¹ 欧阳小平^{1*} 夏 兰² 朱 俭² 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800

²中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海, 201800

摘要 为实现多束超短脉冲束间同步状态的诊断, 提出并验证了一种用于多束超短脉冲相干合成的束间同步诊断技术方案。以两束皮秒量级的超短脉冲为例, 采用了时分复用的方法。首先, 基于互相关的方法来实现两束超短脉冲之间的时间同步, 然后在时间同步范围内, 通过调节光束之间的相位差, 并同步监测远场上焦斑干涉图样的变化来实现两束超短脉冲之间的相位同步。在该方案中, 时间同步调节模块的调节精度为 6.7 fs, 调节范围为 333 ps; 相位同步调节模块的调节精度为 0.007π , 调节范围为 150π 。实验结果表明, 基于该诊断技术方案, 能够实现两束超短脉冲间的束间同步状态的诊断。

关键词 超快光学; 超短脉冲; 相干组束; 超短脉冲测量; 相位测量

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0902004

Research on Diagnostics for Synchronization of Multi-Ultrashort Pulses

Wang Yang¹ Zhu Baoqiang¹ Ouyang Xiaoping¹ Xia Lan² Zhu Jian² Zhu Jianqiang¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

²Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract In order to realize the diagnostics for synchronization of multi-ultrashort pulses, a method to diagnose the synchronization of multi-ultrashort pulses is provided and tested. Taking two beams of picoseconds ultrashort pulses for example, the time division multiplexing method is used. Based on the cross-correlation method, the time synchronization between these two pulses is realized at first. Then, the phase difference of the beams within the range of time synchronization is adjusted. By monitoring the focal spot on far-field can implement the phase synchronization of two pulses. In this scheme, the regulation precision of temporal synchronization and phase synchronization is 6.7 fs and 0.007π , respectively. The adjustable range of temporal and phase module is 333 ps and 150π , respectively. The experimental results show that by using this diagnostics scheme the diagnostics for synchronization between two ultrashort pulses can realized.

Key words ultrafast optics; ultrashort pulse; coherent beam combination; ultrashort pulse measurement; phase measurement

OCIS codes 320.7100; 140.3298; 120.5050

1 引 言

随着高功率激光技术的发展, 高能超短脉冲激光尤其是皮秒级拍瓦激光系统在快点火、先进辐射光源、以及极端条件下的物理实验等方面都发挥了重要的基础性作用。快点火技术方案的理论研究表明, 超短脉冲的能量应当大于 200 kJ, 脉宽应当小于 20 ps^[1]。目前国际上的单束拍瓦激光的最大输出能量为 2.6 kJ, 脉宽为 1~100 ps^[2]。受限于高能超短脉冲激光系统的破坏阈值, 特别是大口径光栅, 单束激光输出能量的提升

收稿日期: 2015-04-01; 收到修改稿日期: 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(11204330)

作者简介: 王 杨(1989—), 女, 硕士, 研究生, 主要从事高功率激光参数测量方面的研究。

E-mail: wangyang20080820@126.com

导师简介: 朱宝强(1964—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: oyxp@siom.ac.cn

已经非常有限。因此为了获得更大的输出能量、更高的聚焦功率密度,研究人员提出了基于多束超短脉冲的相干组束的技术方案,即相干合成技术^[3]。理论上 N 束超短脉冲激光实现相干合成后,聚焦焦斑功率较单光束可提高 N 倍,峰值功率密度较单光束可提高到 N^2 倍。美国国家点火装置(NIF)目前正在开展该方面的技术研究,提出了通过控制束间的相位同步状态,来提升短脉冲合成后焦斑聚焦性能的技术方案^[4]。

提出一种用于多束超短脉冲相干合成的诊断方案。以两束皮秒量级的超短脉冲为例,首先基于互相关的方法实现两束脉冲之间的时间同步,其次以远场的焦斑干涉图作为判断依据,调节相位延迟器来实现两束脉冲之间的相位同步。实验结果表明,该方案能够实现两束超短脉冲的同步诊断。

2 原 理

多束超短脉冲激光的相干合成,要求必须同时实现光束间的时间同步和相位同步。在此技术方案中,首先利用互相关的方法来实现时间同步状态的诊断,然后在时间同步范围内,根据焦斑干涉图样的变化,调节并实现相位同步状态的诊断。

在时间同步状态的测量和控制过程中,以两束脉冲为例,第一束脉冲 $I_1(t)$ 和第二束脉冲 $I_2(t)$ 之间的互相关信号可以表示为

$$I_x(\tau) = \int I_1(t)I_2(t-\tau)dt, \quad (1)$$

式中 τ 为两束超短脉冲之间的时间延迟。通过调节两束超短脉冲之间的时间延迟 τ , 观测互相关信号的强度变化,可以实现时间同步状态的调节^[5]。当互相关信号强度达到最大值时,即 $\tau=0$, 可以认为两束脉冲之间实现了时间同步。

在相位同步状态的测量和控制过程中,多光束干涉图像本质上类似于杨氏双缝干涉的远场焦斑图像的叠加。

分析其远场上的光场强度分布。对于 $M \times N$ 束激光,其近场的光场分布表达式可写为^[6]

$$E(x,y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N E_{mn}(x,y) \exp[i\varphi_{mn}(x,y)], \quad (2)$$

式中 $\varphi_{mn}(x,y)$ 为第 mn 束激光的初始相位, M 、 N 分别为光束近场分布的行数与列数。

假设单光束口径为矩形,且为理想平面波,光强为 1,则单束光近场分布为

$$E_{mn}(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x-m\delta_x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-n\delta_y}{b}\right), \quad (3)$$

式中单束光口径大小为 $a \times b$; 相邻光束横向和纵向行列间隔分别为 δ_x 和 δ_y , 因为光束为理想平面波, 所以有 $\exp[i\varphi_{mn}(x,y)] = \exp(i\varphi_{mn})$ 。

则

$$E(x,y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \text{rect}\left(\frac{x-m\delta_x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-n\delta_y}{b}\right) \exp(i\varphi_{mn}). \quad (4)$$

根据夫琅禾费衍射原理,其远场上的光场分布为

$$U\left(\frac{x}{\lambda f}, \frac{y}{\lambda f}\right) = \frac{ab}{i\lambda f} \text{sinc}\left(\frac{ax}{\lambda f}\right) \text{sinc}\left(\frac{by}{\lambda f}\right) \cdot \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \exp\left(-i\frac{2\pi m x \delta_x}{\lambda f} - i\frac{2\pi n y \delta_y}{\lambda f}\right) \exp(i\varphi_{mn}). \quad (5)$$

式中光源的波长为 λ , 聚焦透镜的焦距为 f 。

当光束间相位差为 0 时,不妨假设 $\varphi_{mn} = 0$, 即光束间实现相位同步。则远场上光强分布为

$$I = \left(\frac{ab}{\lambda f}\right)^2 \text{sinc}^2\left(\frac{ax}{\lambda f}\right) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{by}{\lambda f}\right) \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi x M \delta_x}{\lambda f}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi x \delta_x}{\lambda f}\right)} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi y N \delta_y}{\lambda f}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi y \delta_y}{\lambda f}\right)}. \quad (6)$$

以双光束的相干合成为例,即 1×2 束激光,假设其束间相位差为 φ , 则远场上光强分布为

$$I = 4 \left(\frac{ab}{\lambda f} \right)^2 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{ax}{\lambda f} \right) \cdot \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{by}{\lambda f} \right) \cos^2 \left(\frac{\pi y \delta_y}{\lambda f} + \frac{\varphi}{2} \right). \quad (7)$$

式中 $\operatorname{sinc}^2 \left(\frac{ax}{\lambda f} \right) \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{by}{\lambda f} \right)$ 表示衍射因子, $\cos^2 \left(\frac{\pi y \delta_y}{\lambda f} + \frac{\varphi}{2} \right)$ 为引入相位的干涉因子。

在理想平面波的假设下,根据以上理论推导可以得出,影响聚焦焦斑光强分布的主要参数有:单光束口径 a 、 b ,光束间距 δ_y (在下文中将表示为 d),光束波长 λ ,透镜焦距 f ,以及光束相位差 φ 。在实际的激光系统中,以上各参数除相位外均为常数,且聚焦焦斑条纹级数受占空比(即 d/a)影响,实际束间相位差为 $\Delta\varphi = 2 \left(\frac{\pi y \delta_y}{\lambda f} + \frac{\varphi}{2} \right)$ 。当光束间相位差为 $\Delta\varphi = 2\pi$ 的整数倍时,光强有最大值,焦斑有最佳的能量集中度,且不会发生分裂;当 $\Delta\varphi = \pi$ 的奇数倍时,焦斑分裂成等光强、等大小的两个焦斑;当 $\Delta\varphi = \pi/2$ 的奇数倍时,焦斑分裂为一大一小的两个焦斑,其中当 $\Delta\varphi = 3\pi/2$ 的奇数倍时,焦斑也分裂为一大一小的两个焦斑,但其大小焦斑的相对位置与相位延迟为 $\pi/2$ 时恰好相反,即大小焦斑的左右(或上下)位置相互调换。

3 实 验

实验原理图如图1所示。其中M1和M5为半透半反镜;M2、M3、M4、M6均为全反射镜,其中M4是由两个互相垂直的全反射镜组成,构成时间调节模块(TDU),且安装在带有千分尺的平移台上。M6与晶体BBO一起安装在滑动导轨上,制成可移入移出结构。实验中采用波长为 $1.053 \mu\text{m}$ 的皮秒调试光源,输出状态为 1 mJ 、 10 ps 、 1 Hz ,光束直径为 4.5 mm ,透镜的焦距为 600 mm 。该系统理论上计算获得的 86.5% 环围能量直径为 $171 \mu\text{m}$ 。在束间同步诊断技术研究中,该皮秒调试光源被M1一分为二,分为透射脉冲和反射脉冲。分别在透射光路中加入巴俾涅补偿器(PDU),在反射光路中加入时间调节模块TDU。为使CCD上测量结果更加准确,采用了一个4倍放大的显微物镜(MO)(后面的数据计算均已除以4倍)。

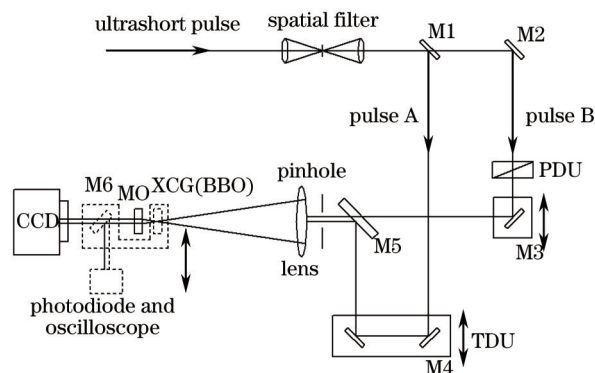


图1 束间同步诊断实验原理图

Fig.1 Schematic of temporal synchronization module for multi-ultrashort pulses

皮秒级脉冲光经半透半反镜M1后被分为两束,透射脉冲经M2反射后进入巴俾涅补偿器PDU,后经过M3和M5后,通过透镜会聚到远场;反射脉冲经M4与M5反射后也被透镜会聚到远场。在粗安装过程中采用精度约为 1 mm 级卷尺进行光程测量,尽可能保证透射光程与反射光程相等,文章中为使原理表达清晰,夸大了图中M5处两束光之间的间距。

在实验过程中,首先将倍频晶体与M6移入实验光路,基于互相关原理^[7],进行时间同步状态的调节。互相关过程中采用晶体为BBO,参数为 $\theta = 23^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 。时间调节模块TDU中采用了具有差分结构的精密平移台,精度为 $1 \mu\text{m}$,对应的时间调节精度为 6.7 fs ,调节量为 50 mm ,对应的时间调节范围为 333 ps 。在时间同步状态调节过程中,通过调节TDU中的精密平移台,并观察示波器上的输出信号强度变化情况。当信号达到最大时且无突变,即可认为两束超短脉冲之间实现了束间时间同步,其数据结果如图3所示。

然后将倍频晶体BBO和反射镜移除,进行相位同步状态的调节。在相位调节模块PDU中,巴俾涅补偿器型号为Thorlab的SBC-IR。通过标定,对于波长为 1053 nm 的激光,相位变化 2π 对应的调节距离为 0.285 mm ,

千分尺精度为 0.001 mm, 即相位调节精度为 $2\pi/285=0.007\pi$ 。调节单元的行程为 22 mm, 对应的相位调节范围为 150π 。通过调节巴俾涅补偿器 PDU, 可改变两束超短脉冲之间的位相差, 并通过观察 CCD 上的焦斑分裂情况, 来实现双光束的干涉调节。在位相调节过程中, CCD 上观察到的实验结果如图 4 所示。

通过分别遮挡透射脉冲和反射脉冲, 可以实现相干合成的两束脉冲自身的远场分布特性。实验中, 光束口径 a 为 4.5 mm, 双光束中心间距 d 为 7.5 mm。实验结果表明, 透射脉冲 $I_1(t)$ 的远场分布特性如图 2(a) 所示, 86.5% 的环围能量对应的直径为 418 μm , 约为 2.444 DL(DL 表示衍射极限); 反射脉冲 $I_2(t)$ 的远场分布特性如图 2 (b) 所示, 86.5% 的环围能量对应的直径为 468 μm , 约为 2.737DL。

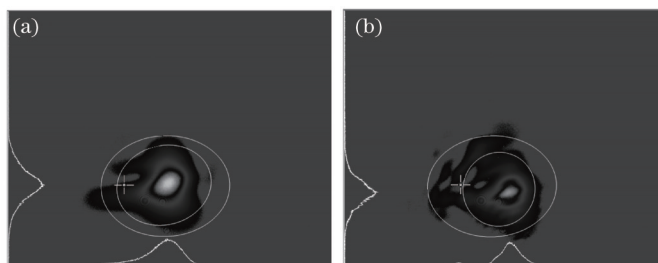


图 2 (a)透射脉冲及(b)反射脉冲的远场分布

Fig.2 Far field intensity distribution of (a) transmission pulse and (b) reflective pulse

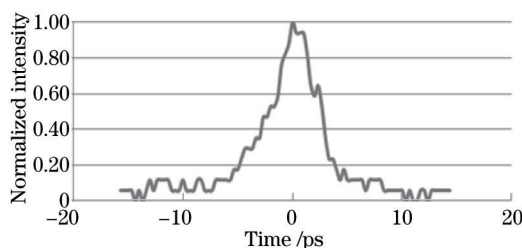


图 3 束间时间同步测试数据

Fig.3 Results of diagnostics for temporal synchronization

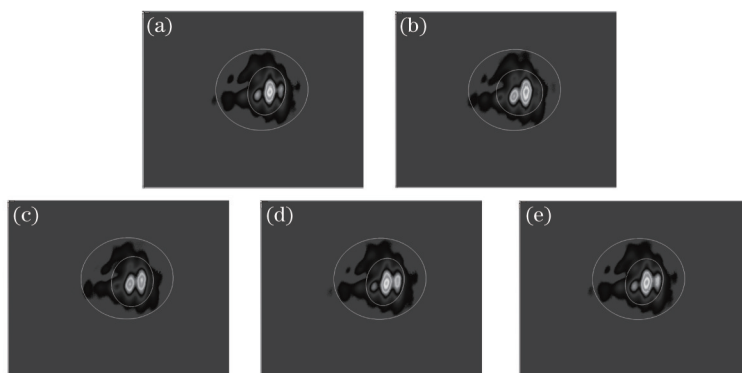


图 4 束间同步诊断测试远场焦斑分布。(a) $2n\pi$; (b) $2n\pi+\pi/2$; (c) $2n\pi+\pi$; (d) $2n\pi+3\pi/2$; (e) $2n\pi+2\pi$

Fig.4 Far field intensity results of diagnostics for beam synchronization. (a) $2n\pi$; (b) $2n\pi+\pi/2$; (c) $2n\pi+\pi$; (d) $2n\pi+3\pi/2$; (e) $2n\pi+2\pi$

束间同步诊断技术的实验研究中, 透射脉冲、反射脉冲、相干合成脉冲在远场上的可聚焦能力如表 1 所示。其中光束间距与光束口径之比 $d/a=1.55$ 。

根据表 1 可以看出理想平面波对应的 86.5% 环围能量直径值与实际光束的 86.5% 环围能量直径值还是有较大差别, 这是由于激光束本身及光路系统造成的。从实验结果中还可以发现, 虽然远场焦斑干涉图上的焦斑分裂状态已经发生了明显的变化, 但是环围能量的直径只有小幅的波动。这是因为, 相位上的变化所对应的是局部区域的能量重新分配。该局部区域的尺度为干涉条纹间距的 3 倍左右。因此, 相位变化导致中心亮斑及其附近区域的强度变化, 而不改变更大视场范围内的能量分布。所以, 在后续的研究工作中应当利用脉冲相干合成后的焦斑上中心亮斑的强度、或者中心亮斑强度与邻近的次级亮斑强度的比值, 作为束间同步状态的判断依据。

表 1 不同光束的远场可聚焦能力

Table 1 Capability of focusing with different beams

Far-field distribution	Diameter of 86.5% encircled energy / μm	Diffraction limit ratio
Theoretical value of plane-wave	171	
Transmitted pulse	418	2.444
Reflected pulse	468	2.737
Coherent pulse $2n\pi$	411	2.404
Coherent pulse $2n\pi+\pi/2$	409	2.392
Coherent pulse $2n\pi+\pi$	412	2.409
Coherent pulse $2n\pi+3\pi/2$	414	2.421
Coherent pulse $2n\pi+2\pi$	412	2.409

由于影响干涉测量光束的远场分布的因素众多,在本实验方案设计中,主要考虑以下几个方面:1) 双光束中心间距 d ,根据夫琅禾费多缝衍射原理,光束间距 d (狭缝间距)与光束宽度 a (狭缝宽度)之比会直接影响焦平面上干涉条纹的数量^[8],为了实现现象明显同时又不会对聚焦能量产生太大影响的目的,采用 $d=1.55a$,并在后续研究中考虑根据对理论结果图像分析引入一个比例参数来进行结果修正;2) 两子光束光强之比,由于远场条纹对比度直接受双光束光强影响,在实验时尽量保证双光束间光强相等;3) 光学元件表面多次反射,为消除分束片以及类似元件本身引起的多光束干涉效应对于实验结果的影响,实验中的分光镜均具有一定楔角(约 1°)以避免表面引起的干涉效应,同时在后表面光强很弱的情况下,干涉条纹的对比度很低而不容易出现;4) 光束指向性^[9],由于本方案中进行相干合成的光束均依赖反射镜进行手动调节,因此不可避免地会引入光束指向性误差,在后续研究中需要进一步解决。在接下来的工作中还需要进一步考虑波前畸变^[10]及系统像差等因素对实验结果的影响。

在实验中还发现,环境中的空气流动、实验人员走动所造成的扰动对相干合成后的焦斑分布具有非常明显的影响。为了提供稳定、可靠的诊断技术解决方案,需要在后续的研究工作中采取措施,解决稳定性问题。

4 结 论

提出并验证了一种用于多束超短脉冲相干合成的诊断技术方案。以两束皮秒量级的超短脉冲为例,利用时分复用方法,首先基于互相关的方法来实现两束脉冲之间的时间同步,然后在时间同步范围内,以远场的焦斑干涉图作为判断依据,通过调节相位延迟器来实现两束脉冲之间的相位同步。该方案的时间同步调节精度为 6.7 fs ,调节范围为 333 ps ;相位同步调节精度为 0.007π ,调节范围为 150π 。实验结果表明,借助于该诊断技术,能够满足两束超短脉冲的束间同步状态诊断技术需求。在后续的研究中将考虑采用焦斑干涉图上的光强及其比值作为束间同步状态的判断依据,并进一步完善该系统,以解决环境因素等引起的不稳定性。

参 考 文 献

- 1 Cai Hongbo, Wu Sizhong, Wu Junfeng, *et al.*. Review of the current status of fast ignition research at the IAPCM[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2014, 2(6): 1-9.
- 2 J H Kelly, L J Waxer, V Bagnoud, *et al.*. OMEGA EP: High-energy petawatt capability for the OMEGA laser facility[J]. Journal De Physique IV, 2006, 133: 75-80.
- 3 Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE J Selected Topics in Quantum, 2005, 11(3): 567-577.
- 4 Yang Baolai, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.*. Research of all-fiber laser coherent combining system based on fiber-loop[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1005001.
杨保来, 王小林, 周 朴, 等. 全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1005001.
- 5 Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua, *et al.*. Research on precise diagnostics for picosecond single shot pulse[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408003.
欧阳小平, 杨 琳, 彭永华, 等. 皮秒自相关仪的性能测试研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408003.
- 6 Gao Yanqi, Ma Weixin, Zhu Baoqiang, *et al.*. Phase control requirements of high intensity laser beam combining[J]. Applied Optics, 2012, 51(15): 2941-2950.

- 7 Wang Zhaohua, Wei Zhiyi, Zhang Jie, *et al.*. Measurement of femtosecond laser pulses[J]. *Physics*, 2002, 31(10): 659–666.
王兆华, 魏志义, 张 杰, 等. 飞秒脉冲测量技术[J]. *物理*, 2002, 31(10): 659–666.
- 8 Li Jing, Gong Yan, Liao Jiasheng, *et al.*. Long trace profiler based on multiple-beam interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0323001.
李 晶, 巩 岩, 廖家胜, 等. 基于多光束干涉的长程轮廓仪[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0323001.
- 9 Yang Zhenming, Kong Lingjiang, Xiao Feng, *et al.*. Coherent beam combination based on array of liquid crystal optical phased arrays [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121402.
杨镇铭, 孔令讲, 肖 锋, 等. 基于液晶相控阵阵列的激光相干合成方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121402.
- 10 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Wavefront propagation modeling and verification of the SG- II updated laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0214001.
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 神光 II 升级装置波前传输计算模型与验证[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0214001.

栏目编辑: 宋梅梅