

互相关法实现超短脉冲精确延时的探测及控制

郝欣^{1,2} 朱启华¹ 王逍¹ 王晓东¹ 耿远超^{1,2} 张颖¹ 周凯南¹ 黄征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 中国工程物理研究院 研究生部, 四川 绵阳 621900)

摘要 在超短超强激光装置中, 强激光与靶物质相互作用产生等离子体, 为了获知等离子体的演化规律, 需要准确控制探针光与打靶主激光的相对延时, 精度须达到几十飞秒至几皮秒。为此设计了一台延时测量仪, 该测量仪基于超短脉冲强度二阶单次互相关测量原理, 利用非线性晶体的非共线和频效应, 采用线阵 CCD 采集探针光与打靶光产生的和频光空间光强分布曲线, 通过测量和频光强峰值的相对移动量, 反映探针光与打靶光的相对延时, 控制延时光路达到两光束的精确延时。详细阐述了该延时测量仪的构型, 讨论了超短脉冲强度互相关测量的原理, 理论分析了两光束的相对时间差与和频光峰值相对移动量之间的关系, 通过数值模拟给出了两光束夹角对延时测量精度的影响, 可根据不同要求改变两光束夹角更换晶体, 以满足延时精度及延时范围的要求。在理论分析的基础上进行了初步的实验验证。

关键词 超短激光脉冲; 高精度光延时; 互相关法; 探针光

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0162

Using Crosscorrelation to Detect and Control the Accurate Delay Time of Ultrafast Pulses

Hao Xin^{1,2} Zhu Qihua¹ Wang Xiao¹ Wang Xiaodong¹ Geng Yuanchao^{1,2} Zhang Ying¹
Zhou Kainan¹ Huang Zheng¹

(¹ *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)
(² *Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

Abstract In the high-power ultrafast laser system, interaction between the high-power laser and target substance would produce plasma, in order to know the evolvement of the plasma, the delay time between probe laser and main laser should be controlled accurately, in which the precision of delay need to be several picoseconds even several femtoseconds. Therefore an instrument, which was based on the ultrafast pulses crosscorrelation theory, by utilizing the sum frequency generation effect, CCD to collect the spatial intensity distribution of sum frequency beam, was designed. By measuring the shift of curve peak, the delay between fundamental beams can be calculated, the fundamental beams can be accurately delayed by controlling the optical layout. The conformation of delay instrument was described, the principle of the ultrafast pulses crosscorrelation measurement was discussed, the relationship between the delay time and the shift of the curve peak was analyzed theoretically. The influence on the measure precision caused by the angle of fundamental beams was discussed numerically, to reach a much more accurate delay time, we can change the nonlinear crystal according to the beam angle.

Key words ultrafast laser pulse; accurate delay; crosscorrelation; probe laser

1 引言

近年来, 随着超短脉冲激光技术和器件的飞速发展, 各种不同类型超短超强脉冲激光装置已先后问世, 这些激光装置的广泛应用, 为激光聚变物理、

高温高密度等离子体相互作用、强场物理、X 光激光及等离子体诊断等学科的研究提供了强有力的手段^[1]。在强场物理等实验中, 强激光与靶物质相互作用产生等离子体, 要进行等离子体参数的精密诊

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室项目(9140C6803020605)资助课题。

作者简介: 郝欣(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事超短激光脉冲技术方面的研究。E-mail: xinh19@126.com

导师简介: 朱启华(1969—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事超短激光脉冲技术方面的研究。E-mail: qihzh@163.com

断,往往还需要一束与主激光同步的探针光,通过改变主激光与探针光之间的相对延时,来获知等离子体的演化规律,因此,需要精确探测和控制主激光与探针光之间延时(要求精度控制在几皮秒至几十飞秒),以获得准确的物理数据及规律。

目前,激光束之间延时关系的探测一般常用的方法是快光电二极管加示波器或条纹相机^[2],其延时控制则往往靠延时电路来实现^[3]。然而光电二极管测量范围一般在纳秒量级,最快的 25 ps 同时需要配备 10 G 以上的高档示波器。条纹相机也只能测量几十皮秒的范围。这两种方式都有局限性,且测量精度不能达到要求。而在控制延时方面,即使精度很高的步进电机(步长微米量级),由于机械性回程差、掉步、空程等缘故也可能带来微米量级的误差,不借助高精度的监测手段不可能精确控制延时的变化,故在使用步进电机调节延时的同时,还需对延时量进行精确监测。为此我们需要一套高精度测量仪,配合步进电机使用能够准确探测、控制延时,提高精度。本文设计了一台精确延时测量仪,该测量仪利用超短激光互相关测量原理,通过监测和频光强峰值移动量,可以准确的测量、控制打靶主激光与探针光的相对延时时间。

2 基本原理

由于光电转换^[4]需要一定响应时间,因此我们利用光光转换进行两束光的延时测量^[5]。该测量仪基于非线性晶体的非共线相位匹配和频效应^[6],利用线阵 CCD 采集探针光与主激光互相关产生的和频光强空间分布曲线,通过测量互相关信号峰值的相对移动量,获知探针光与打靶光相对延时的变化,二阶互相关精确测量延时基本原理如图 1 所示。

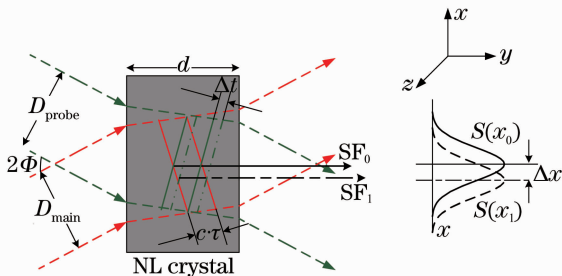


图 1 二阶单次互相关测量精确延时原理示意图

Fig.1 Schematic of single-shot, second-order crosscorrelation measures accurate delay

当探针光 $I_{probe}(t)$ 和主激光 $I_{main}(t)$ 以一定的夹角 2ϕ 非共线入射时,互相关信号只在两脉冲的时间和空间共同的重合点产生,强度正比于该点基频光

强的乘积,CCD 接收到的光电流 $S(x_0)$ 为

$$S(x_0) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} I_{probe}(t) I_{main}(t) dt, \quad (1)$$

方向平行于两束光夹角的平分线 SF_0 方向。这样一来,互相关函数转化为和频光的空间强度分布曲线 $S(x_0)$ (沿 x 方向),这一分布可由 CCD 相机记录。那么中心线 SF_0 (即交迭区的平分线)代表两个脉冲在时间上的完全交迭,也是 CCD 采集到的和频光强峰值位置。

当探针光与主激光的相对延时改变 Δt 时,由于两光束非共线传输,交迭区位置不仅会在 y 方向前后移动,且在 x 方向左右移动。也就是说,两个脉冲在时间上的完全交迭的中心线 SF_1 (图中虚箭头线所示)较 SF_0 会在 x 方向产生相对移动 Δx ,此时由 CCD 接收到的和频光强空间分布曲线 $S(x_1)$ 峰值较 $S(x_0)$ 峰值坐标在 x 方向亦存在相对移动 Δx ,故可通过测量 Δx 反映探针光与主激光相对延时的变化量 Δt ,控制延时光路、监测 CCD 采集到的互相关峰值相对移动量,达到两光束的精确延时。

3 测量装置

我们设计的延时测量仪光路图如图 2 所示。探针光与主激光(图中分别用红绿线表示)共线传输,经 A 处双色镜后,两光束沿不同的光路传播。二者分别经延时光路 1、2(这两个延时光路由步进电机控制,配合 CCD 使用,用于精确调整光路延时),传输到分束镜 BS1、BS2 处,一部分光经分束镜反射,聚焦后注入靶室,在靶心处放置 BBO 晶体使其产生和频信号,微调延时光路,当和频信号光强最强时两光束准同步;另一部分光经分束镜透射,分别由 B、C 两反射镜传输到非线性晶体 BBO 处,探针光与主激光以夹角 2ϕ 入射 BBO 晶体,满足相位匹配条件时产生和频光(图中用蓝线表示),用线阵 CCD 采集定

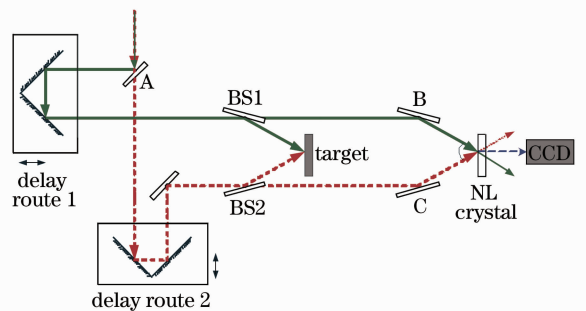


图 2 延时测量仪的光路图

Fig.2 Optical route of delay measurement instrument

标前探针光和主激光准同步时产生的互相关信号,并记录互相关峰值初始位置 P_0 。

4 相对时延的测量

4.1 定标

在对探针光和主激光进行相对延时前需要对测量仪进行定标。即先调整两光束使其准同步,记录初始互相关峰值位置 P_0 ;然后在经分束镜透射到BBO晶体的两光路中,选择一路垂直于光束传播方向插入标准片,并记录互相关峰值位置 P_1 ,则互相关峰值位置相对移动量 $\Delta x = P_0 - P_1$ 。

对不同波长、不同角度入射的相关信号及其峰值移动进行了实验,在此列举两例。实验(a)中,使用厚度 $d=477 \mu\text{m}$ 、折射率 $n=1.54$ 的石英晶体作标准片,标准片数目 $N=3$,探针光和主激光皆为 1053 nm ,二者以较大角度入射。CCD测得初始峰值位置 P_0 1561 pixel,插入标准片后峰值位置 P_1 1485 pixel,实验采集到的互相关信号分别如图3、图4所示。为了测量计算方便,我们定义互相关峰值位置每移动单位像素,两光束的相对延时量称作定标系数 r ,表达式为

$$r = \frac{(n-1) \times d \times N}{P_0 - P_1} \times \frac{c}{c}, \quad (2)$$

式中 c 为真空中光速,此时定标系数 $r_a = 34 \text{ fs/pixel}$ 。

实验(b)中,使用厚度 $d=100 \mu\text{m}$ 的石英晶体作标准片,标准片数目 $N=1$,探针光和主激光皆为 800 nm ,二者以小角度入射。CCD测得 $\Delta x = 90 \text{ pixel}$,此时定标系数 $r_b = 2 \text{ fs/pixel}$ 。这两个实验中像元尺寸均为 $7 \mu\text{m}$,但由于产生相关信号的两束光夹角不同,定标系数相差十多倍。

定标后,移走标准片,调节延时光路,通过监测

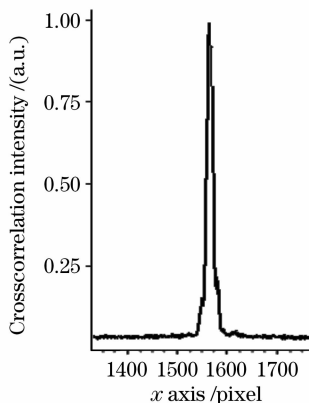


图3 初始峰值位置 P_0 。

Fig. 3 Initial position of the curve peak P_0 。

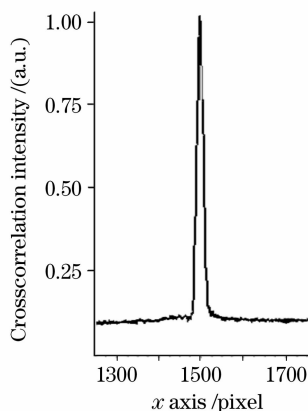


图4 定标峰值位置 P_1 。

Fig. 4 Position of the curve peak P_1 when set criterion CCD采集到的互相关信号峰值相对移动量 Δx ,可计算出探针光和主激光的相对延时 Δt ,避免了步进电机机械回程差、掉步或空程等原因造成的误差。该装置在实现测量高精度相对延时的同时,也可以实现光束延时的准确控制。

4.2 互相关测量数值计算模型

由上述二阶单次互相关的原理可看出,两基频光脉冲的相对延时会引起和频光强峰值位置的移动,以下我们将通过数值模拟分析相对延时与峰值移动量间的关系,以及两光束夹角对测量精度的影响。首先建立数值模型,基频光脉冲模型用矩阵来表示:矩阵的两维分别表示空间和时间,矩阵值对应一定空间一定时刻的光强分布。假设激光脉冲在时间上呈高斯分布,矩阵行代表空间光强分布,矩阵列代表光强时间分布,主激光和探针光分别表示为

$$I_{\text{main}}(t) = A_1 \exp(-t/\tau_1)^2, \quad (3)$$

$$I_{\text{probe}}(t) = A_2 \exp(-t/\tau_2)^2, \quad (4)$$

式中 A_1 、 A_2 分别代表主激光、探针光脉冲峰值, τ_1 、 τ_2 为两脉冲脉宽。

本文数值计算模型由三个矩阵来表示:矩阵1、2分别模拟传播方向与 y 轴夹角为 $\pm\phi$ 的两束基频光,矩阵3的元素值由矩阵1、2交叠后对应元素的相乘得到。图5模拟了 $\phi=11.5^\circ$ 时,CCD接收到的调节光路前的和频光以及较之延迟 30 fs 的和频光空间强度分布(沿 x 方向),图中分别用红黑曲线标示,二者峰值间距 74 pixel 。横轴表示 CCD的接收轴即 x 轴,单位为 pixel,纵轴表示接收到的相对和频光强。

下面将基于上述模型计算分析,其参数取值分别为 $A_1=1/\pi$, $A_2=1/2\pi$, $\tau_1=30 \text{ fs}$, $\tau_2=100 \text{ fs}$,初始时和频光光强峰值位于 $x=800 \text{ pixel}$ 线上。事实

上这些取值只是为了便于表述和说明,对后面的分析结果并无影响。

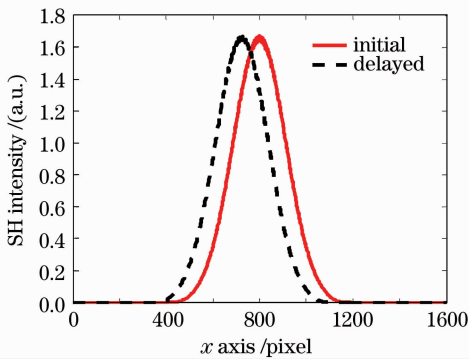


图5 两光束延时前、后 CCD 接收到的光强分布曲线对比图
Fig. 5 Crosscorrelation intensity curves before and after delayed

4.3 相对延时与峰值移动量间的关系

通过数值模拟来分析研究一下,在两基频光夹角不变的情况下,改变相对延时对和频光强分布曲线峰值位置的影响。

如图6所示(横轴表示相对延时,单位为 fs;纵轴表示峰值相对移动量 Δx ,单位为 pixel),实、虚线分别表示 $\phi_1 = 11.5^\circ$ 、 $\phi_2 = 23^\circ$ 时, Δx 随相对延时的变化。由图易看出对于同一 ϕ 值, Δx 随相对延时的增加呈近线性递增,线性增长斜率即为该角度定标系数的倒数 $1/r$;对于不同 ϕ 值, ϕ 值越小斜率越大,即移动量 Δx 随延时的改变量越大,当然角度越小延时测量的范围也越小,如图6中角度 ϕ_1 在 150 fs 以后为直线,这就是由于超出延时测量范围造成的。

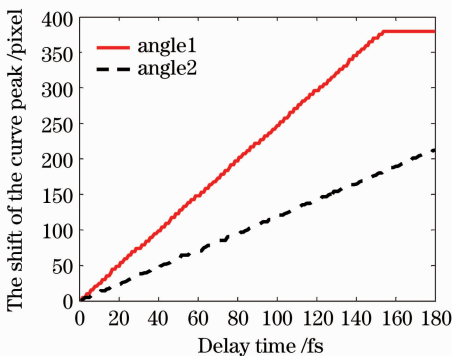


图6 相对延时与峰值移动量间的关系
Fig. 6 Relationship between the delay time and the shift of the curve peak

4.4 两光束夹角对测量精度的影响

下面我们通过数值模拟来研究一下,在两基频光相对延时不变的情况下,改变两光束夹角 2ϕ 对和频光强分布曲线峰值位置的影响。如图7所示,在相对延时为 30 fs 时,改变两基频光夹角 2ϕ ,和频光

强峰值的移动量 $\times x$ 随 2ϕ 的增大呈指数衰减。图中横轴表示两基频光夹角 $2\phi [2\phi \in (0.06, 3)]$,单位为 rad;纵轴表示脉峰相对移动量 Δx ,单位为 pixel。

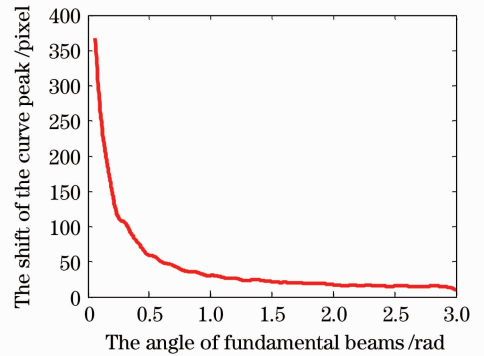


图7 两光束夹角对值峰移动量的影响
Fig. 7 Influence on the measure precision caused by the angle of fundamental beams

因此在实际操作中,如果要求测量精度较高,应尽量选取探针光和主激光小角度入射,将 ϕ 值控制在 10° 以内,则微小的延时也可以使和频光强峰值有明显的移动;但小角度测量延时范围也较小,因此在要求测量延时范围较大时,应选两光束较大夹角入射。故在实验中应根据具体情况为两光束选择合适的夹角及晶体。

5 结 论

研究讨论了运用超短脉冲互相关法实现飞秒量级精确延时的测量与控制,阐述了测量原理,并为之设计了一套延时测量仪,可通过该测量仪对超短脉冲延时进行精确的探测与控制。对该测量仪进行了定标,通过数值模拟计算,分析了探针光和主激光相对延时与和频光强脉峰移动量之间的关系,以及两光束夹角对脉峰移动量的影响,可以得出:1)在两光束夹角不变的前提下,改变延时,和频光强脉峰峰值移动量随延时的增加呈线性递增。且线性增长斜率与夹角 2ϕ 大小有关, 2ϕ 越小斜率越大,移动量随延时改变越大,但夹角越小延时测量范围也越小;2)在相对延时不变的前提下,改变两光束夹角 2ϕ ,和频光强脉峰峰值的移动量 Δx 随 2ϕ 的增大呈指数衰减。即当探针光和主激光小角度入射时,微小的延时也可以使和频光强脉峰峰值有明显的移动。因此在实验中,可根据具体测量要求选择合适的夹角及晶体。

参 考 文 献

- system[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(6): 426~428
- 2 Zhao Wei, Yang Binzhou, Liu Jinsheng *et al.*. Study of UV laser fiducial monitor for X-ray streak camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(1): 126~130
赵 卫,刘晋升,杨斌洲 等. X射线条纹相机紫外光时标研究[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(1): 126~130
- 3 Guo Liangfu, Zhang Shukui, Wang Xiaodong *et al.*. High precision multi-pass synchronously delay triggering control system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(6): 715~720
郭良福,张树葵,王晓东 等. 高精度超短脉冲激光多路同步延时触发控制系统[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(6): 715~720
- 4 Jonathan P. Pratt, Vincent P. Heuring. Delay synchronization in time-of-flight optical systems[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(14): 2430~2438
- 5 J. Kim, F. X. Kärtner, M. H. Perrott. Femtosecond synchronization of radio frequency signals with optical pulse trains[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(17): 2076~2079
- 6 M Raghuramaiah, A K Sharma. A second-order autocorrelator for single-shot measurement of femtosecond laser pulse durations[J]. *Sadhana*, 2001, **26**(6): 603~611