

文章编号: 1001-3806(2013)03-0385-04

## 一种调节飞秒激光脉冲时空重合的新方法

史彦超, 刘作业, 赵培茜, 郭泽钦, 丁鹏基, 刘情操, 胡碧涛\*

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

**摘要:** 为了实现调节两束飞秒激光脉冲在时间和空间区域上的精确重合, 采用利用 CCD 成像系统调节光束在空间上的重合及利用能量计测量激光脉冲核心能量变化来调节飞秒脉冲间的时间间隔的新方法, 取得了核心能量随延迟时间变化的数据, 并记录了相应的等离子体荧光图像。结果表明, 与传统方法相比, 这种方法可以达到飞秒级的时间重合精度。这为确定激光的时空重合提供了一种简便有效的途径, 且在激光光束以大角度相交时仍然可以确定最佳重合点。

**关键词:** 激光技术; 延迟时间调节; 核心能量; 能量计

中图分类号: O437

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.026

### A novel method to adjust the spatio-temporal superposition between two femtosecond laser pulses

SHI Yan-chao, LIU Zuo-ye, ZHAO Pei-xi, GUO Ze-qin, DING Peng-ji, LIU Qing-cao, HU Bi-tao

(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** To achieve accurate spatio-temporal superposition between two femtosecond laser pulses, a CCD imaging system was used to adjust the spatial superposition of both the beams and an energy meter was applied to measure the core energy of the probe pulses so that the temporal separation between the pulses could be adjusted. The dependence of the core energy on the time delay and the corresponding plasma fluorescence distribution were obtained. The experimental result proves that this method can achieve a higher time accuracy (femtosecond scale) than the traditional method, even when the crossing angle between the two femtosecond laser beams is vertical.

**Key words:** laser technique; time delay adjusting; core energy; energy meter

## 引言

近 10 年来, 随着啁啾脉冲放大技术的产生, 激光脉冲的脉宽发展到 10fs 量级<sup>[1]</sup> 且脉冲能量不断地提高。这一技术的发展刺激了激光与物质之间的相互作用的研究<sup>[2]</sup>, 开启了阿秒物理、电子加速<sup>[3]</sup>、激光聚变、相对论等离子体物理及强场物理等领域的研究。但是多束飞秒激光脉冲之间时间、空间重合的调节和测量的困难, 严重制约了相关研究工作的进程。激光脉冲在空气中传输时会形成等离子体光丝<sup>[4]</sup>, 而时空相互重合的两条光丝会由于干涉作用产生等离子体光栅<sup>[5]</sup>, 传统的飞秒激光脉冲延迟

的调节就是基于这一原理, 根据等离子体光栅的产生来判断两束激光脉冲是否重合。等离子体光栅只能在大约 2 倍的脉冲宽度的时间范围内产生, 对应的精密位移台的行程仅仅为十几个微米, 这样给调节工作带来了极大的制约。两束非共线飞秒激光光丝相互作用时, 激光脉冲的能量转移会以超连续光发射<sup>[6]</sup> 和锥角辐射<sup>[7]</sup> 的形式而损失, 导致激光脉冲的核心能量出现明显的降低。根据这一原理, 利用 CCD 成像系统观测光丝的空间重合, 利用能量计测量光丝核心能量的变化来调节两束激光脉冲的时间重合。与传统的方法相比较, 新方法具有较高的精度且操作简单。

## 1 实验装置与测量原理

### 1.1 实验装置

实验中采用 1 台 1KHz 的钛宝石啁啾脉冲放大系统<sup>[8]</sup> 输出 1 束中心波长为 810nm、脉宽约 33fs 的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91026021)

作者简介: 史彦超(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为飞秒激光脉冲的非线性效应。

\* 通讯联系人。E-mail: hubt@lzu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-10; 收到修改稿日期: 2012-09-25

激光脉冲,实验光路简图见图1。图中, $M_1 \sim M_7$ 为800nm高反镜; $M_8 \sim M_9$ 为266nm高反镜; $C_1$ 为镀铝曲面镜;block为有孔挡板。由激光器输出的激光脉冲被分光镜(Beam splitter,BS)分为两束,将之标记为抽运光与探测光。其中抽运光的峰值能量为0.9mJ,经1个焦距为60cm的透镜 $L_2$ 聚焦而在空气中产生1束长约1.5cm的飞秒光丝。探测光的峰值能量为0.6mJ,通过1个焦距为117cm的透镜 $L_1$ 聚焦,获得了1个长度约为3cm的光丝。 $M_3$ 和 $L_1$ 被固定在位移台<sup>[9]</sup>上来调节探测光丝与抽运光丝的夹角 $\theta$ 。 $M_4$ 和 $M_5$ 固定在1台精密位移台上组成飞秒延迟线,以便于调节探测光和抽运光的时间延迟。该精度位移台的分辨率为 $0.625\mu\text{m}$ ,平移精度小于 $3\mu\text{m}$ ,单步步长为 $2.5\mu\text{m}$ 。使用8位CCD探测系统来观测两束飞秒光丝的空间关系和记录等离子体的荧光图像,其型号为Guppy F-503B(AVT Camera, Germany),像素为 $2592 \times 1944$ ,最小像元为 $2.2\mu\text{m} \times 2.2\mu\text{m}$ ,并通过电脑软件对CCD捕捉到的信息进行处理。CCD的位置通过3台1维电动导轨进行调节,在3个方向上的分辨率为 $0.625\mu\text{m}$ ,平移精度小于 $3\mu\text{m}$ ,用来寻找最佳的等离子体荧光图像。

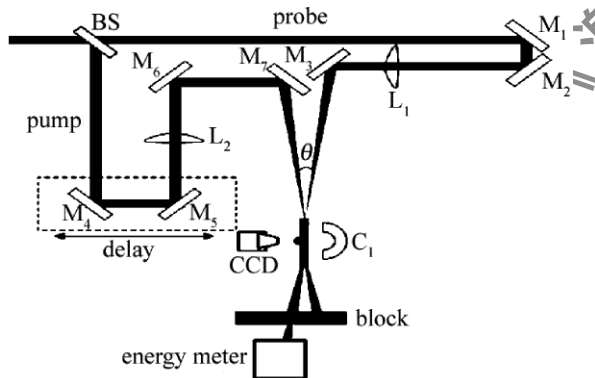


Fig. 1 Schematic of experimental setup

两束飞秒光丝相互作用产生的等离子体荧光会被曲面镜 $C_1$ 收集并投射到CCD上而实现对等离子体区域的成像。在经过相互作用区域后,其中抽运光会被1个挡板阻挡住,而探测光丝中的锥角辐射会被1个光阑小孔挡掉,这样能量计只会记录到探测光丝的核心能量。利用精密位移台来改变抽运光与探测光的光程差,以便于研究探测光的核心能量与延迟时间的依赖关系。

## 1.2 测量原理

当两束飞秒激光脉冲在水平上不重合时,通过CCD成像可以观测到两束激光脉冲之间有明显的缝隙。由于进入CCD的像是两束飞秒光丝的荧光

经同一曲面镜汇聚而成的,因此,当两束激光光丝在竖直方向上不重合时,两束光经曲面镜汇聚而形成的焦点在竖直方向上也不重合,这时经CCD观测到的两束光的像,当有1束光丝的像是清晰的实像时,另外1束就会是发散的虚像。这样使用1台CCD就可以确定两束飞秒光丝在水平和竖直两个方向上的重合关系。

两束飞秒激光脉冲相互作用时,激光的强度并不是两束激光脉冲能量的线性叠加。由于干涉作用的存在,作用区域钳制的激光强度仅仅增加了40%<sup>[10]</sup>,并形成等离子体光栅。场致电离是产生强度钳制极限的内在原因,激光能量通过场致电离以等离子体荧光的形式而损失<sup>[11]</sup>。传统的方法就是根据这一现象来确定的两束激光脉冲的时空重合性。最新研究表明,当两条飞秒激光光丝相互作用时,在几百个飞秒的延迟范围内,由于交叉相位调制效应,激光脉冲的能量会以超连续谱发射和锥角辐射的形式损失,导致激光光束的核心能量减少。利用这一原理,通过测量探测光的核心能量的变化就可以确定两束激光脉冲的时间重合性。

## 2 实验结果与讨论

探测光与抽运光经聚焦后形成两束飞秒激光光丝并以 $2.9^\circ$ 夹角相交时,探测光的核心能量随延迟时间的关系如图2所示。可以发现,激光脉冲的核心能量在200fs的范围内发生了明显的减少,而200fs对应的步进电机行程为 $60\mu\text{m}$ 。当抽运光丝与探测光丝的时间间隔为0时,交叉相位调制作用达到最强,而探测光的核心能量最小。同时等离子体光栅荧光分布被CCD所记录,图3a~图3j分别对应两束激光脉冲时间延迟为 $-83.5\text{fs}$ , $-66.8\text{fs}$ , $-50.1\text{fs}$ , $-33.4\text{fs}$ , $-16.7\text{fs}$ , $0\text{fs}$ , $16.7\text{fs}$ , $33.4\text{fs}$ , $50.1\text{fs}$ , $66.8\text{fs}$ 时的等离子体光栅图像。通过比较等离子体光栅的荧光图像发现,在两束飞秒光丝之

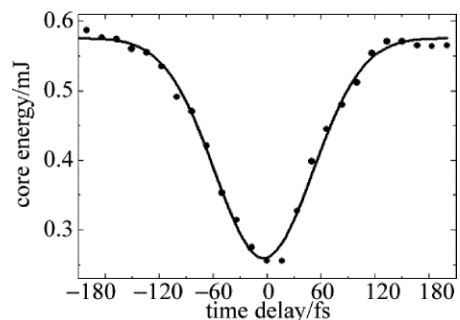


Fig. 2 Relationship between core energy and time delay when  $\theta$  set to be  $2.9^\circ$

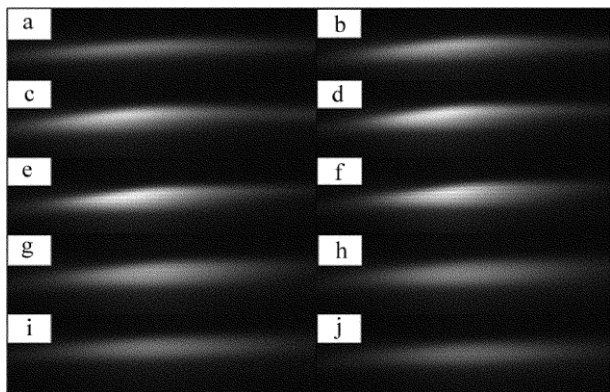


Fig. 3 Plasma fluorescence with time delay set to be - 83. 5fs , - 66. 8fs , - 50. 1fs , - 33. 4fs , - 16. 7fs , 0fs , 16. 7fs , 33. 4fs , 50. 1fs , 66. 8fs respectively

间的延迟时间改变的过程中,等离子体光栅的亮度和长度都出现了明显变化。当两束光丝之间的时间差异减小时,光栅的长度增加,荧光亮度增强,如图 3a ~ 图 3f 所示。当随着延迟时间继续增加,等离子体光栅条纹开始出现如图 3g ~ 图 3j 所示的明显衰减。但是在时间重合最佳点附近  $\pm 50.1\text{fs}$  的时间范围内,等离子体荧光图像的长度和亮度没有明显变化,实验中也无法轻易分辨出等离子体光栅的最佳时刻,因此,使用等离子体荧光图像的变化来确定最佳时间重合的精确度劣于  $50.1\text{fs}$ 。受实验条件的限制,新方法所使用的步进电机的 1 个步长为  $2.5\mu\text{m}$  对应时间约为  $16.7\text{fs}$ 。通过图 2 发现,根据探测光丝能量变化调节时间重合,时间重合精度优于 1 个步长即  $16.7\text{fs}$ 。这就可以推测:如果利用更高精度的步进电机来调节时间延迟,新方法还可以更高精度的时间重合,而传统方法则不能。

作者进一步研究了两束光在  $90^\circ$  相交情况下,探测光丝核心能量随时间延迟的变化关系。实验发现,探测光的核心能量仍然会因交叉相位调制作用而出现能量转移现象。因此,仍然可以根据能量的变化来确定时间重合最佳点。但是根据公式  $\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin(\frac{\theta}{2})}$  可知,此时的等离子体光栅的周期长度  $\Lambda \approx 573\text{nm}$  远远小于激光脉冲的 1 个波长,在这种情况下无法发生干涉效应而产生等离子体光栅。一般来讲,在这种情况下可以利用等离子体荧光的强度来确定两束激光脉冲的时间重合性。实验记录了时间延迟分别为  $-66.8\text{fs}$ ,  $-50.1\text{fs}$ ,  $-33.4\text{fs}$ ,  $-16.7\text{fs}$ ,  $0\text{fs}$ ,  $16.7\text{fs}$ ,  $33.4\text{fs}$ ,  $50.1\text{fs}$ ,  $66.8\text{fs}$  时的相互作用区域处的等离子体荧光图像,分别如图 4a ~ 图 4i 所

示。通过与时间符合最佳处的荧光图像进行比较,发现在不同的时间延迟情况下,等离子体荧光的强

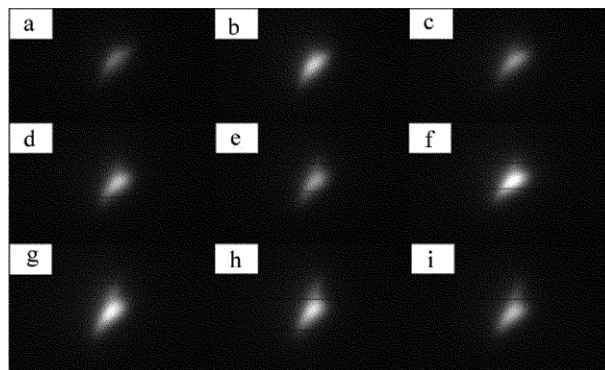


Fig. 4 Plasma fluorescence with time delay set to be - 66. 8fs , - 50. 1fs , - 33. 4fs , - 16. 7fs , 0fs , 16. 7fs , 33. 4fs , 50. 1fs , 66. 8fs respectively

度变化极不明显,难以分辨出等离子体荧光强度最强的时刻。所以相对于小角度而言,传统方法在大角度情况下的精度更低,劣于  $66.8\text{fs}$ 。然而探测光丝能量对延迟时间仍然具有极大的依赖关系。通过图 5 可以发现,利用新方法来调节时间延迟的精度依然可以达到 1 个步长即  $16.7\text{fs}$ 。

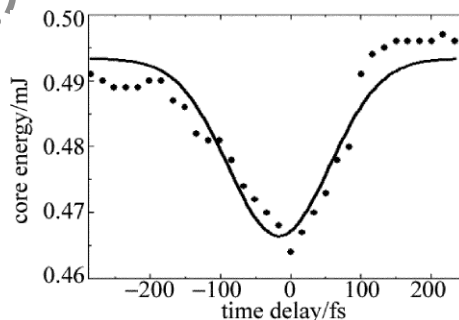


Fig. 5 Relationship between core energy and time delay when  $\theta$  set to be  $90^\circ$

### 3 结 论

实验证明,利用传统方法确定两束飞秒激光脉冲的时间间隔的精确度较差,特别是在两束飞秒脉冲以大角度相交时,时间重合精度更低,可以说是无法分辨。而作者提出的新方法,在时间重合性上的精确较高,且不论是两束激光脉冲大角度还是小角度相交时都可以适用。由于探测脉冲的核心能量变化会出现在一个较长的时间范围内,所以新方法具有极高的可操作性。

#### 参 考 文 献

[1] LIU W J, LI H J, QU Sh L, *et al.* Femtosecond pulse compression in external cavity [J]. Laser Technology 2007, 31(6): 665-667 (in Chinese).

- [2] SHI L P , LI W X , WANG Y D , *et al.* Generation of high-density electrons based on plasma grating induced Bragg diffraction in air [J]. *Physics Review Letters* 2011 ,107( 9) : 095004.
- [3] YIN F , TAO X Y. Acceleration of relativistic electrons in Gaussian laser electromagnetic field [J]. *Laser Technology* ,2011 ,35( 3) :384-387( in Chinese) .
- [4] CHIN S L , HOSSEINI S A , LIU W , *et al.* The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics , applications , and new challenges[J]. *Canadian Journal of Physics* , 2005 ,83(9) : 863-905.
- [5] SHENG Z M , ZHANG J , UMSTADTER D. Plasma density gratings induced by intersecting laser pulses in underdense plasmas [J]. *Journal of Applied Physics* 2003 ,B77( 6/7) : 673-680.
- [6] CORKUM P B , ROLLAND C. Supercontinuum generation in gases[J]. *Physics Review Letters* ,1986 ,57( 18) :2268-2271.
- [7] NIBBERING E T J , CURLEY P F , GRILLON G , *et al.* Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air [J]. *Optics Letters* ,1996 ,21( 1) : 62-65.
- [8] STRICKLAND D , MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications* ,1985 ,56( 3) : 219-221.
- [9] LIU X L , SUN Sh H , REN Zh G , *et al.* Micro-displacement measurement system of pulse equivalent and return difference of a stepping motor[J]. *Laser Technology* 2011 ,35( 5) : 603-605( in Chinese) .
- [10] KASPARIAN J , SAUERBREY R , CHIN S L. The critical laser intensity of self-guided light filaments in air [J]. *Journal of Applied Physics* 2000 ,B71( 6) : 877-879.
- [11] KOSAREVA O G , LIU W , PANOV N A , *et al.* Can we reach very high intensity in air with femtosecond PW laser pulses [J]. *Laser Physics* 2009 ,19( 8) : 1776-1792.

版权所有 © 《激光技术》编辑部