

激光与光电子学进展

基于时间拉伸的飞秒光丝动态测量方法研究

王小月^{1,2}, 王子健¹, 彭博¹, 黄坤¹, 闫明^{1,2*}, 刘伟伟³, 曾和平^{1,2}¹华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;²华东师范大学重庆研究院精密光学重庆市重点实验室, 重庆 401147;³南开大学现代光学研究所, 天津 300071

摘要 将时间拉伸色散傅里叶变换测量方法应用于飞秒光丝成像研究。通过光谱-空间编码的方式, 结合高速单点探测器及示波器, 实现了对飞秒光丝瞬态演化过程的一维成像。成像空间分辨率为 60 μm , 刷新速率为 54.54 MHz。本文方法避开了 CCD 对图像刷新率的限制, 为研究光丝与物质相互作用动力学提供了新方法。

关键词 超快光学; 光丝; 成像; 傅里叶变换; 飞秒激光

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1336001

Study on Dynamic Measurement of Femtosecond Filaments Based on Time-Stretch Technology

Wang Xiaoyue^{1,2}, Wang Zijian¹, Peng Bo¹, Huang Kun¹, Yan Ming^{1,2*}, Liu Weiwei³, Zeng Heping^{1,2}¹State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;²Chongqing Key Laboratory of Precision Optics, Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401147, China;³Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract In this paper, the time-stretch dispersive Fourier transform is applied to imaging femtosecond laser induced filaments. One-dimensional imaging of the transient evolution of a filament is realized by using spectral-spatial coding method combined with a fast photo-detector and an oscilloscope. The spatial resolution is 60 μm and the refresh rate reaches 54.54 MHz. The proposed method avoids the limitation of refresh rate caused by CCD and provides a new method for studying the dynamics of the filament-matter interaction.

Key words ultrafast optics; filamentation; imaging; Fourier transforms; femtosecond laser

高能飞秒激光在介质中传输引起的成丝现象为探索光与分子相互作用过程提供了重要平台^[1], 并且在大气遥感、污染物检测、太赫兹源等领域展现了较大的应用价值^[2]。通常激光诱导等离子体通道(即光丝)的形成机制被认为是光学克尔效应引起的自聚焦与等离子体散焦效应间的动态平衡。这种平衡过程伴随了一系列复杂的非线性光学效应, 如多光子电离、光强钳制、光斑自整形、脉冲自陡峭与自压缩、锥状辐射等^[3]。对光丝的观测是研究复杂光学现象的重要方面。目前, 常用的观察方法包括纹影法^[4]、飞秒时间分辨光偏振法(FTOP)^[5]、氢腔、超连续谱、光谱层析^[6]等。这些

方法为揭示光丝的内在物理机制提供了重要工具。然而受到 CCD 响应速率的限制, 光丝演化过程的高速动态成像测量仍面临挑战。

基于时间拉伸色散傅里叶变换(TS-DFT)的成像技术可以实现图像更新速率高达百兆赫兹的高速成像^[7]。该方法通过将脉冲光谱信息映射到时间域及空间域的方式, 再结合高速光电探测器及示波器, 即可实现单脉冲光学成像, 其成像速率等于脉冲重复频率。该方法在激光锁模动力学^[8]、光谱测量、高通量癌细胞检测^[9]等领域展现了巨大潜力。然而, 该方法目前尚未被应用于光丝动态过程研究。

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-02-22; 录用日期: 2022-02-25

基金项目: 科技部重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(12022411, 61875243)

通信作者: *myan@lps.ecnu.edu.cn

本文首次报道了一种基于 TS-DFT 的飞秒光丝动态成像测量方法。实验上利用 TS-DFT 技术对单脉冲诱导的等离子体光丝空间分布及时间演化过程进行了高速观测,验证了该方法在测量时间、数据更新率及信息量等方面的优势,为研究气体介质中光丝诱导的物理过程(如热力学过程)提供了新途径。

图 1 为实验装置图。钛宝石激光器(Ti:sapphire laser; Legend Cryo PA, Coherent Inc.)输出中心波长为 800 nm,脉宽为 50 fs 的脉冲序列。其脉冲重复频率为 1 kHz,单脉冲能量为 2 mJ。激光经焦距 $f=100$ mm 的透镜 L1 后在空气中聚焦,并在焦点附近形成长约 0.5 cm 的光丝诱导等离子体通道。本文利用自行搭建的 TS-DFT 系统对光丝通道中的空气折射率演化过程进行观测。系统的探测光源为一台锁模掺铒光纤激光器,其中心波长为 1560 nm,谱宽为

50 nm,重复频率为 54.54 MHz。通过入射光栅对(G1、G2)对探测光进行了空间色散。光谱在空间呈线性啁啾分布。色散后光斑呈长条形,长度约为 1 cm。该空间啁啾的探测光通过柱透镜 L2($f=50$ mm)聚焦于光丝轴线。穿过光丝后,探测光经过镜像结构的柱透镜 L3 及光栅对(G3、G4)并由光纤耦合器(COL)耦合进入一段长 800 m 的单模光纤(SMF, 1550 nm 处色散为 -23 ps²/km)。该光纤用于对探测脉冲的时间进行拉伸。该系统采用高速光电探测器(FPD; Finisar XPDV2320R, 40 GHz)对拉伸后的光脉冲进行探测,并由高速数字示波器(Keysight DSAV334A, 33 GHz, 80 GSa/s)对信号进行记录。钛宝石激光器的脉冲监测端与示波器连接,用于提供数据采集的触发源。需要说明的是,这里的探测脉冲与诱导光丝的激发脉冲同步。

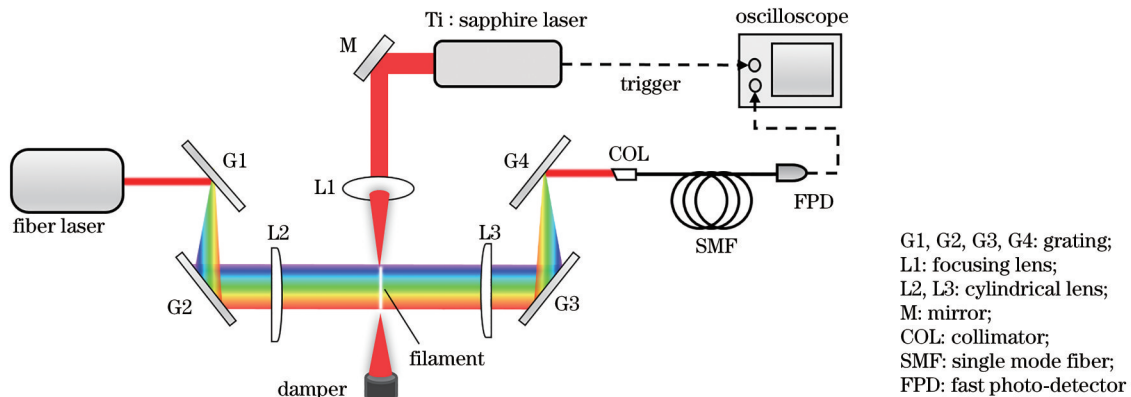


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental scheme

实验首先记录了无光丝情况下的探测信号,见图 2(a)。图 2(b)为脉冲序列的放大图。脉冲的重复频率(54.54 MHz)即为测量的更新速率,单次测量时间为拉伸后脉冲宽度(3 ns)。图 2(c)对单个时间拉伸 TS-DFT 脉冲(红色)与光谱仪(OSA)测量的谱线数据(黑线)进行了对比,验证了 TS-DFT 光谱测量的可靠性。由于探测脉冲的光谱成分与光斑空间位置呈一一对应关系(即光谱-空间编码),则可将 TS-DFT 的光谱数据转换为光丝的一维图像数据。图 2(d)为光丝存在情况下的 TS-DFT 测量结果,总测量时长为 50 μ s(2800 个测量周期)。因为光丝等离子体通道引起了空气折射率的变化,使得探测光透过光丝后发生偏折,从而降低了光纤耦合效率,导致图 2(d)中凹陷处的出现。该凹陷反映了光丝通道中空气密度随时间变化情况。图 2(d)中脉冲信号底部的变化是由高速光电探测器所致。

将图 2(d)的数据以二维平面图^[10]的形式展示在图 3 中。由图 2(c)可知,拉伸时间与波长的关系近似为 30 nm/ns;色散系统引入的波长与空间位置的关系

近似为 9 nm/mm。图 3 展现了光丝中心轴线(z 轴)上不同位置处空气密度的快速演化过程。图 3 的时间分辨率为 18.3 ns,该值取决于探测脉冲重复周期;空间分辨率为 60 μ m,该值受限于色散系统的光谱分辨率(0.6 nm)。图 3(b)与(c)给出了光丝不同位置处探测光强的变化,该变化反映了空气折射率随时间的演化情况。该过程的时间尺度为 μ s 量级,且两处结果基本一致,表明光丝引起的空气折射率变化具有空间一致性。为了方便展示,这里对数据进行了归一化处理。

需要说明的是,TS-DFT 技术的时间分辨率受限于脉冲重复频率。采用高重复频率激光脉冲(如常见的 1 GHz 或 10 GHz)可以实现亚纳秒量级的时间分辨能力。这对于研究光丝中等离子的动力学过程具有潜在价值。此外,在 1 ns 至 1 μ s 之间的高速成像器件及技术较为少见。将 TS-DFT 与飞秒光丝相结合可以为研究 ns 和 μ s 尺度的光丝诱导化学反应或热力学物理过程提供新的途径。

本文通过演示实验验证了 TS-DFT 对单个飞秒脉冲诱导的瞬态过程进行观测的可行性。这对于研

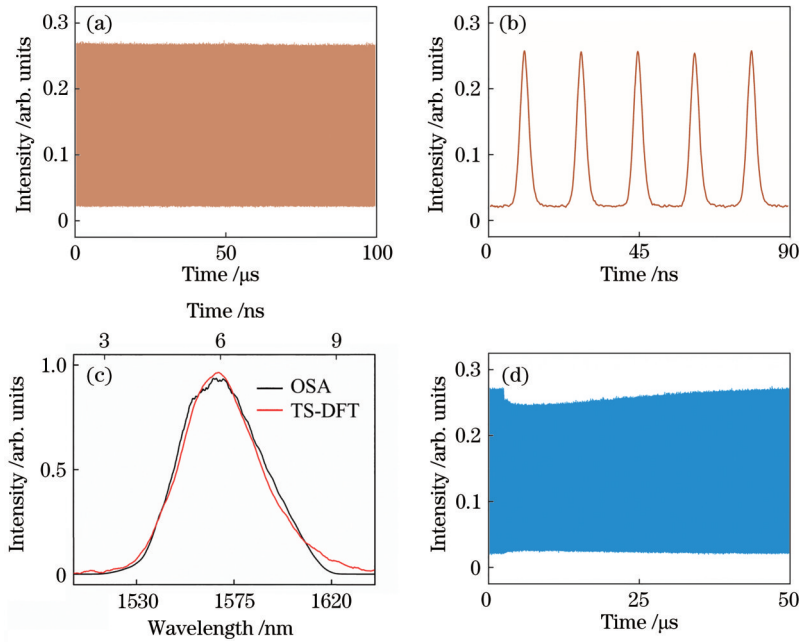


图 2 探测信号的时间轨迹。(a) 无光丝时的探测信号; (b) 图(a)的放大图; (c) TS-DFT 与 OSA 测量的谱线; (d) 光丝存在时的探测信号

Fig. 2 Time traces of probe signal. (a) Probe signal without filament; (b) enlarged view of Fig. (a); (c) spectra measured by TS-DFT and OSA; (d) probe signal in the presence of filament

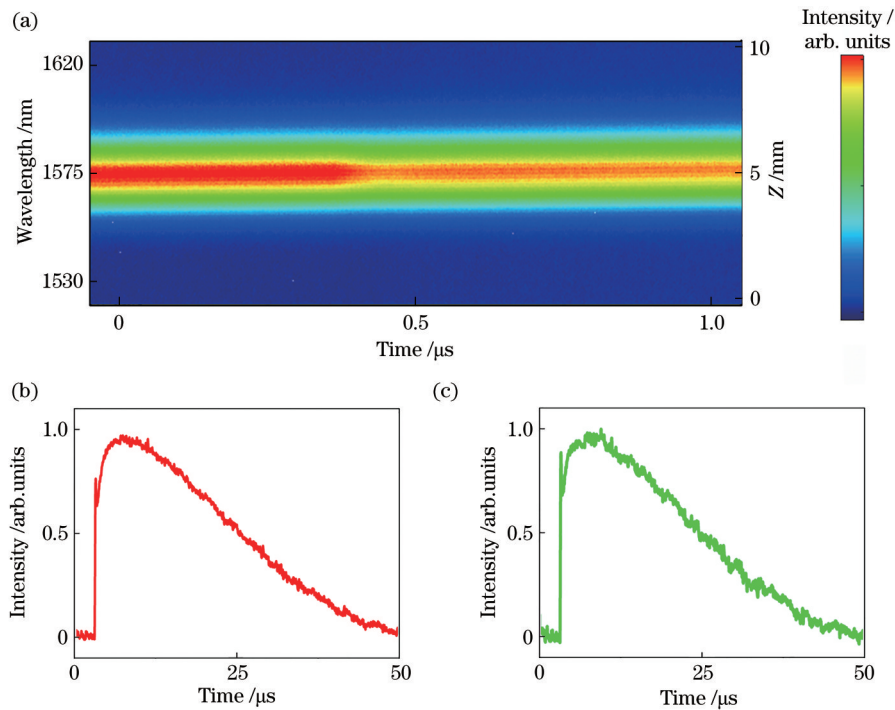


图 3 实验结果。(a) TS-DFT 强度图; (b) $z=5$ mm 与 (c) $z=4$ mm 处信号随时间演化曲线

Fig. 3 Experimental results. (a) TS-DFT intensity map; evolution curves of signal with time at (b) $z=5$ mm and (c) $z=4$ mm, respectively

究非重复或不稳定环境及快速变化条件下的光丝与物质相互作用过程(如, 燃烧诊断等^[11])具有一定价值。进一步优化 TS-DFT 的空间分辨率, 实现对光丝区域的二维高速成像, 是本课题组下一步的研究内容。

参 考 文 献

[1] Su Q, Sun L, Chu C Y, et al. Effect of molecular orbital angular momentum on the spatial distribution of fluorescence during femtosecond laser filamentation in air

- [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2020, 11(3): 730-734.
- [2] Li B, Zhang D Y, Liu J X, et al. A review of femtosecond laser-induced emission techniques for combustion and flow field diagnostics[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1906.
- [3] 鲁建英, 耿德坤, 陈朗. 强激光水中诱导等离子体冲击波数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902001.
Lu J Y, Geng D S, Chen L. Numerical simulation of high intensity of laser induced plasma shock wave in water [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0902001.
- [4] Tan J J, Luo Y, Ye S J. A highly sensitive femtosecond time-resolved sum frequency generation vibrational spectroscopy system with simultaneous measurement of multiple polarization combinations[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2017, 30(6): 671-677.
- [5] 陈俊波, 曾亚光, 袁治灵, 等. 基于动态散斑的光学相干层析成像技术[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0111001.
Chen J B, Zeng Y G, Yuan Z L, et al. Optical coherence tomography based on dynamic speckle[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0111001.
- [6] Mahjoubfar A, Churkin D V, Barland S, et al. Time stretch and its applications[J]. Nature Photonics, 2017, 11(6): 341-351.
- [7] Wang X Y, Ren X Y, Peng J S, et al. On the Q-switching bunch dynamics in the build-up of stretched-pulse mode-locking[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2747-2753.
- [8] Chen J, Zhao X, Li T, et al. Generation and observation of ultrafast spectro-temporal dynamics of different pulsating solitons from a fiber laser[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 14127-14133.
- [9] Dai B, He L, Zheng L L, et al. Ultrafast cell edge detection by line-scan time-stretch microscopy[J]. Journal of Biophotonics, 2019, 12(1): e201800044.
- [10] Wang X Y, Peng J S, Huang K, et al. Experimental study on buildup dynamics of a harmonic mode-locking soliton fiber laser[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28808-28815.
- [11] 侯梦瑶, 王思琪, 姚丹雯, 等. 激光脉宽和偏振效应对飞秒光丝诱导燃烧中间产物荧光光谱的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508024.
Hou M Y, Wang S Q, Yao D W, et al. Effects of pulse duration and polarization on femtosecond filament-induced fluorescence of combustion intermediates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508024.