

引用格式: HUANG Xia, LIANG Qingqing, MOU Yanfei, et al. Time-resolved Optical Vortex Coronagraph and Its Application in Air Plasma Diagnostic[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(8):0850216

黄霞,梁青青,牟彦霏,等.时间分辨光学涡旋日冕仪及其在空气等离子体诊断中的应用[J].光子学报,2021,50(8):0850216

时间分辨光学涡旋日冕仪及其在空气等离子体 诊断中的应用

黄霞,梁青青,牟彦霏,张文星,程庆庆,刘一

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:将泵浦—探测技术的时间分辨能力引入到光学涡旋日冕仪成像系统中,从而在实现微弱相位型物体无背景成像的同时对其做时间分辨诊断。将该技术应用于飞秒激光激发的空气等离子体的诊断。实验结果表明,利用该技术可以清晰地观察到空气等离子体的生成过程,且实验结果与数值模拟结果符合较好。另外,还观测到空气等离子体的两个衰减过程,并对其进行了双指数拟合分析。其中,具有较快时间尺度(~ 65 ps)的过程主要由电子与正离子复合导致,具有较慢时间尺度(~ 810 ps)的衰减过程主要由自由电子在氧气分子上的附着所致。

关键词:信息光学;灵敏相位探测;光学涡旋日冕仪;空气等离子体;泵浦探测;飞秒激光

中图分类号:O437

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215008.0850216

Time-resolved Optical Vortex Coronagraph and Its Application in Air Plasma Diagnostic

HUANG Xia, LIANG Qingqing, MOU Yanfei, ZHANG Wenxing,
CHENG Qingqing, LIU Yi

(School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China)

Abstract: The ultrafast pump-probe method is introduced into the optical vortex coronagraph technique, which can realize time-resolved background free imaging of a weak phase object. Specifically, the proposed technique is applied to the diagnostic of air plasma pumped by femtosecond laser pulses. Experimental results show that the formation process of air plasma can be clearly measured. The numerical simulation results are consistent with the experimental results. In addition, two decay processes of the plasma are identified and fitted by double exponential decay. The fast process with a short time scale of 65 ps is attributed to the recombination of electrons and positive ions, while the other relatively slow process with a long time scale of 810 ps is due to the attachment of free electrons to oxygen molecules.

Key words: Information optics; Sensitive phase detection; Optical vortex coronagraph; Air plasma; Pump-probe method; Femtosecond laser

OCIS Codes: 070.6110; 110.2970; 320.2250; 320.7090

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 12034013, 11904232),上海市教委创新计划项目(No. 2017-01-07-00-07-E00007)

第一作者:黄霞(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为超快非线性光学。Email: 1731244266@qq.com

导师(通讯作者):梁青青(1981—),女,讲师,博士,主要研究方向为超快非线性光学。Email: qqliang@usst.edu.cn

收稿日期:2021-03-17;录用日期:2021-04-28

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

相位型物体的灵敏检测具有重要科学和实用意义,这些物体包括生物细胞或软组织、透明溶液以及低密度等离子体等弱吸收材料。对于这些相位型物体,传统的成像方法往往因为成像对比度低导致测量不够准确。为了增强成像对比度,边缘增强成像技术应运而生。这一技术能够使图像的边缘强度在成像时得到增加,而中间平坦区域由于干涉相消而变得暗淡,即图像的边缘信息得到了增强^[1]。

基于频域信息调制,边缘增强可有多种方法来实现,如,用滤波器将中心零频完全阻挡或强吸收的暗场法^[2-3],滤除一半频谱或将零频一并除去的光影法^[4-5],使用复合光栅滤波的微分法^[6]。同时,基于泽尼克相衬法,研究人员发现频域相位调制也能实现边缘增强。1950年,KASTLER A等通过对一半频谱增加 π 的相位梯度^[7]实现了图像的希尔伯特变换,该变换能够实现特定方向的边缘增强。此后MARR D等将该方法扩展到二维空间,同时实现两个方向的边缘增强^[8]。1992年,KHONINA S等引入螺旋相位调制实现了图像所有方向的边缘增强^[9]。在此后相当长一段时间内,基于该螺旋相衬技术(Spiral Phase Contrast, SPC),边缘增强技术得到了很大的发展^[10-14]。2005年RITSCH-MARTE M等首次将SPC(螺旋拓扑荷 $l=1$)应用于显微成像^[15],发现相比于传统的暗场边缘增强,该方法具有更明显的增强优势。同年,SWARTZLANDER G A小组^[16]、MAWET D小组^[17]分别引入螺旋相位板(Vortex Phase Plate, VPP)及涡旋半波片(Vortex Retarder, VR2),发现通过频域二阶螺旋相位调制(SPC, $l=2$),孔型物体的成像有类日冕效果,即通光孔径内部的光完全被衍射至孔外,孔径内光强为0。该方法对于非零偶数阶螺旋拓扑荷均有效^[16],并因具有很高的成像对比度而广泛应用于微弱恒星伴星或地外行星探测^[18]。因为该方法的类日冕仪效果,作者将其命名为光学涡旋日冕仪(Optical Vortex Coronagraph, OVC)^[16, 19-20]。近期,本文作者与罗彻斯特理工大学SWARTZLANDER G A教授合作,利用光学涡旋日冕仪通光孔内光强为0的特点,将其发展为任意图像的无背景边缘增强技术,应用于对空气等离子体这一微弱相位型物体的成像探测^[21]。

本工作中将超快泵浦—探测方法引入到光学涡旋日冕仪技术中,从而得到了具有时间分辨能力的光学涡旋日冕仪。该装置能够实现对飞秒至纳秒时间尺度内动力学过程的测量,其时间分辨精度由探测脉冲的脉冲宽度决定。采用该方法,对飞秒激光在空气中激发的等离子体的形成及衰减开展了时间分辨测量,并探究了其衰减动力学机制。

1 时间分辨光学涡旋日冕仪实验装置及原理

1.1 光学涡旋日冕仪原理

光学涡旋日冕仪主要由4F成像装置和置于频谱面的拓扑荷数 $m=2$ 的涡旋相位板(涡旋板函数为 $e^{im\theta}$,其中 θ 为频谱空间的方位角)组成,如图1中右侧黑色虚框B部分所示。目前,常用的涡旋相位板有螺旋相位板和涡旋半波片等。螺旋相位板具有阶梯状的几何结构,平面波入射可输出螺旋状波前的涡旋光^[22]。涡旋半波片由空间可变的折射率液晶聚合物制成,是一种特殊的半波片,其快轴方向随空间方位角变化,在入射光为圆偏振光条件下输出光会携带螺旋相位因子 $e^{im\theta}$ ^[20]。图1中的插图显示了实验中所使用的拓扑荷数 $m=2$ 的涡旋半波片VR2,箭头指向表示了其快轴的方向。

在OVC装置中,平行光入射到小孔后得到圆形光斑,如图1中的(a)所示。入射光场可表示为

$$E_{in}(r, \varphi) = \text{circ}\left(\frac{r}{R}\right) = \begin{cases} E_0 & r < R \\ 0 & r > R \end{cases} \quad (1)$$

式中, r 和 φ 分别表示极坐标下入射面内某点的半径和方位角,circ()为圆函数, E_0 为振幅, R 表示小孔的半径。入射光经过第一个透镜L1后在其后焦面(即频谱面)上得到其频谱组分为入射光场的傅里叶变换

$\text{FT}\left\{\text{circ}\left(\frac{r}{R}\right)\right\}$ 。频谱面上放置拓扑荷数为2的涡旋半波片,则频谱附加了相位因子 $e^{i2\theta}$,频谱信息被调制为

$e^{i2\theta}\text{FT}\left\{\text{circ}\left(\frac{r}{R}\right)\right\}$ 。随后光场经过第二个透镜,输出光场表达式为

$$E_{\text{out}}(r', \varphi') = \text{FT}^{-1} \left\{ e^{i2\theta} \text{FT} \left\{ \text{circ} \left(\frac{r}{R} \right) \right\} \right\} = -\frac{1}{2\pi} e^{i2\varphi'} \int J_2(k_\rho r') \text{FT} \left\{ \text{circ} \left(\frac{r}{R} \right) \right\} dk_\rho \quad (2)$$

由 $\text{HT}_l \{f(r)\} = \int_0^{+\infty} J_l(kr) f(r) dr$ 得

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(r', \varphi') &= -\frac{1}{2\pi} e^{i2\varphi'} \text{HT}_2 \left\{ \text{FT} \left\{ \text{circ} \left(\frac{r}{R} \right) \right\} \right\} = -\frac{1}{2\pi} e^{i2\varphi'} \text{HT}_2 \left\{ 2\pi R^2 \frac{J_1(k_\rho R)}{k_\rho R} \right\} = \\ &= -R e^{i2\varphi'} \text{HT}_2 \left\{ \frac{J_1(k_\rho R)}{k_\rho R} \right\} = \begin{cases} 0 & r' < R \\ -e^{i2\varphi'} (R/r')^2 & r' > R \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, J_l 表示第一类的 l 阶贝塞尔函数, HT_l 表示 l 阶汉克尔变换, $k_\rho = 2\pi\rho/\lambda f$, f 为透镜焦距, λ 为入射光波长, ρ 为焦平面处坐标的径向尺寸。从式(3)可以看出, 焦平面上附加涡旋相位因子调制频谱信息后, 成像面上圆孔内的光强均被衍射到小孔外, 而内部光强为 0, 得到“火环”状的类日冕图像, 如图 1(b) 所示。若用孔径小于 R 的光阑将“火环”外强光阻挡, 理论上则可获得零亮度的暗背景, 如图 1(c) 所示。可知光学涡旋日冕仪技术可提供一种高对比度的成像。

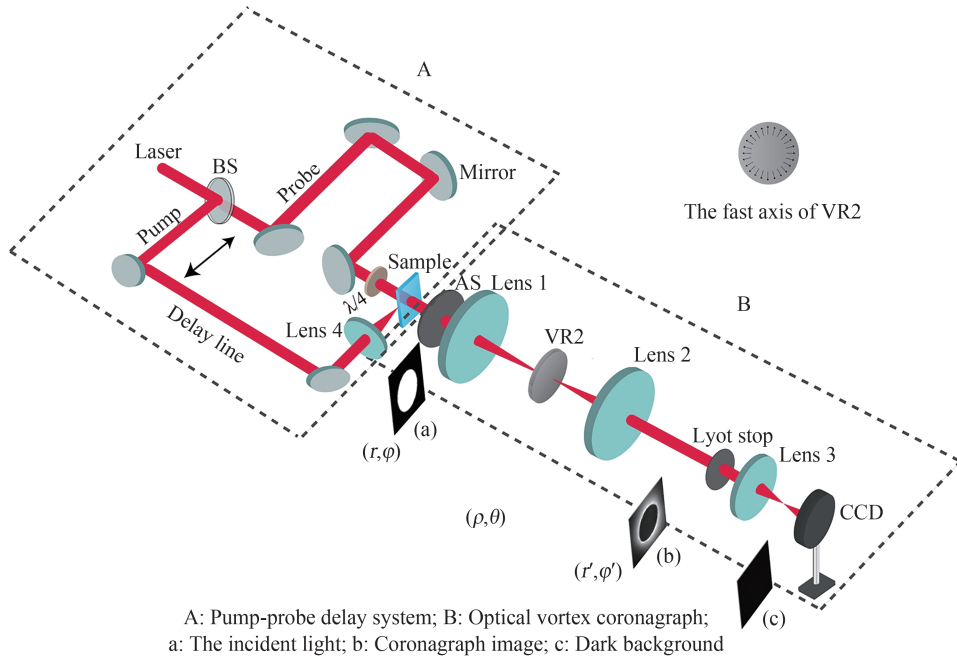


图 1 时间分辨光学涡旋日冕仪实验装置
Fig.1 Experimental diagram of time-resolved optical vortex coronagraph

1.2 时间分辨光学涡旋日冕仪实验装置

本研究利用光学涡旋日冕仪技术的高对比度成像特性, 将其与超快泵浦-探测技术相结合, 从而得到了时间分辨光学涡旋日冕仪 (Time-resolved Optical Vortex Coronagraph, TOVC)。该光学系统不仅可实现对振幅或相位物体的灵敏成像, 还具有时间分辨的能力。实验中使用的激光光源为美国相干公司的钛蓝宝石飞秒激光, 主要参数为: 中心波长 796 nm, 脉冲宽度 35 fs, 重复频率 1 kHz, 水平线偏振输出。

总体实验装置包括飞秒泵浦-探测延时装置 A 和光学涡旋日冕仪装置 (OVC) B 两部分, 如图 1 所示。飞秒激光入射到分束镜后分成透射光和反射光两部分, 分别作为探测光和泵浦光。实验中探测光能量为 14 μJ , 泵浦光能量为 980 μJ 。反射的泵浦光先经过延时系统, 再通过焦距为 100 mm 的透镜 4 聚焦, 最后在 OVC 系统的入射光瞳处电离空气生成等离子体, 该等离子体即作为 OVC 系统的相位型样品。探测光经过多个反射镜后入射到四分之一波片, 此时线偏振光变成圆偏振光, 之后依次经过相位型样品和光学涡旋日冕仪 (OVC) 装置。OVC 系统由小孔 (Aperture Stop, AS, 直径为 2 mm)、透镜 1 和透镜 2 (焦距为 30 cm) 组成的 4F 系统、拓扑荷数 $m=2$ 的涡旋半波片 (型号: VR2-795, LBTEK) 以及成像系统组成, 其中涡旋半波片位

于4F系统的频谱面。实验中,在4F系统的成像面位置放置里奥光阑(Loyt Stop)用于阻挡住外圈的强光,再通过透镜3进行二次成像,最后用CCD(型号:LBP2-HR-VIS2)采集图像。

TOVC装置一方面利用OVC技术的暗背景特性实现无背景成像,另一方面结合超快泵浦-探测手段,能对超快物理过程进行时间分辨成像,从而实现该过程的超快时间诊断。在此装置中,系统的时间分辨精度由探测脉冲的脉冲宽度(35 fs)决定,最长的延迟时间由机械延迟线的长度决定(本装置中为6 ns)。需要注意的是,实验中入射光瞳处AS的最大直径由涡旋半波片的中心奇点大小决定,奇点越小,AS直径越大,即可在更大范围内做到暗背景成像或者可对更大物体进行成像。在本实验中,VR2中心奇点约为15 μm 左右,经验得具有较好日冕效果的AS的直径约为2 mm,该AS对应的艾里斑直径为146 μm 。

2 TOVC技术对空气等离子体的超快诊断

高功率飞秒激光在大气中非线性传输产生的等离子体细丝是个引人入胜的效应,其在激光雷电引导、虚拟微波天线、超宽带太赫兹辐射产生等方面具有重要应用,吸引了大量研究^[23]。实时观测该空气等离子体的发展演化,对于理解“非线性成丝”效应的物理机制、光丝雷电引导、光丝电磁场发射都具有重要意义。早在光丝研究的初期,TZORTZAKIS S等用泵浦-探测结合衍射法,对空气中光丝的衰减过程进行了测量,发现等离子体的寿命约为100 ps左右^[24]。随后,LIU JS等采用改进的泵浦-探测衍射法,测量了等离子体浓度及其寿命与外部聚焦条件的关系^[25]。此后,共线全息法^[26-27]、微波诊断法^[28]、电磁感应法^[29]、利用等离子体增强三次谐波^[30-31]等方法也陆续被应用到空气等离子体密度的时间演化测量中。

以飞秒激光在大气中激发的等离子体丝为研究对象,将TOVC技术应用到对空气等离子体的超快诊断中。图1中的泵浦光在空气中形成等离子体(即样品),等离子体的产生改变了空气介质的折射率,从而改变了通过其中的探测光的相位。该等离子体从产生到复合湮灭的过程中,其密度随时间发生高达6~7个数量级的变化,所以不同时间延迟条件下等离子体施加给探测光的相位变化量不同。根据这一原理,在TOVC技术中通过控制泵浦光和探测光之间的延时,可得到具有时间分辨的等离子体像,从而能够实现对空气等离子体的超快时间分辨诊断。

2.1 空气等离子体形成过程的观测

为了观测空气等离子体的形成过程,实验中设置泵浦-探测时间步长为83 fs,并将系统观测到等离子体刚开始出现时定为时间零点。实验结果如图2(a)所示,是5个不同时间延时下暗背景中的等离子体成像,箭头表示光的传播方向。可以看出,随着延时的增加,等离子体的长度沿光的传播方向逐渐增加,直至等离子体完全形成。同时,对上述过程的日冕仪成像进行了数值模拟,模拟中,假定了光丝等离子引起的横向及纵向的相位变化均为高斯分布,则该相位的最大值(高斯函数的最大值)、横向及纵向腰斑半径可完全模拟光丝等离子体的分布。在具体参数设置中,横向及纵向分布根据实验测量结果设定,高斯分布最大值根据实验图像强度与模拟图像对比给出,图2(b)为模拟结果。图2(b)中分别展示了与图2(a)实验结果相对应的5个不同延时条件下空气等离子体经过OVC系统的成像。在初始阶段,如图2中前两个延时情况下的成像图所示,等离子体纵向非对称性效应较明显。等离子体的这种左右不对称是由于OVC系统探测成像的时间在泵浦光通过几何焦点之前,等离子体还未完全形成引起的,因此此时只能看到焦点之前的部分等离子体。并且,由于泵浦光还未完全聚焦,泵浦激光较低,此时生成等离子体密度也较低,信号较弱,数值模拟中,相位最大值设置为0.1个波数,横向及纵向尺寸根据实验测量分别设置为22 μm 和185 μm 。图2中

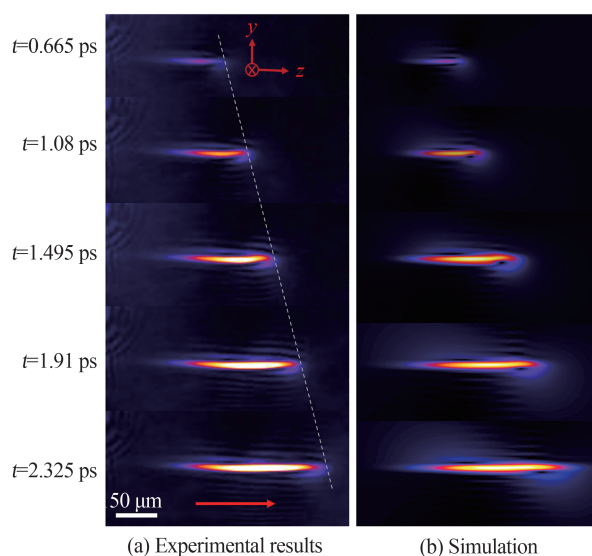


图2 空气等离子体的形成观测实验结果与模拟结果
Fig. 2 Experimental and simulation images of air plasma generation

$t=1.495$ ps时,成像图为探测成像时间在泵浦光通过几何焦点时间附近的情况,此时等离子体丝左右的不对称性达到最高,约一半等离子体丝形成,同时等离子体右侧边缘处的密度也达到最高,对应的模拟中相位最大值设置为0.6个波数,横向及纵向尺寸分别设置为 $37\ \mu\text{m}$ 和 $332\ \mu\text{m}$ 。图2的 $t=1.91$ ps和 $t=2.325$ ps时为探测成像时间在泵浦光通过几何焦点之后的情形。此时,等离子体的右半边逐渐形成,直到3 ps左右等离子体丝完全展现, $t=2.325$ ps对应的模拟中,相位最大值设置为0.6个波数,横向及纵向尺寸分别设置为 $37\ \mu\text{m}$ 和 $450\ \mu\text{m}$ 。

比较图2(a)和(b),可以看到数值模拟结果与实验结果相符合, $m=2$ 的涡旋滤波可以实现对相位型物体的时间分辨无背景成像。

由以上等离子体逐渐出现并最终完全形成的日冕仪成像图,计算了等离子体的最前沿形成过程的传播速度,如图(a)中斜线所示。计算所得等离子体形成向右推进的速度为 2.9775×10^8 m/s,约等于光速,与预期相符。实验结果表明TOVC技术可用于观测等离子体丝的形成过程。

2.2 空气等离子体衰减过程的测量与分析

更进一步,通过采用从皮秒到纳秒量级的时间延时,实验中观测了空气等离子体的衰减过程,结果如图3所示。从图3的6个不同时间延时下的图像可以看出,时间延时 $t=3$ ps情况下的等离子体长度最长,表明此时等离子体已经完全形成;延迟 $t=238$ ps时等离子体长度缩短了三分之一,同时日冕仪图像强度变弱,表明等离子体纵向尖端部位处引起的探测光折射率变化太小,低于日冕仪的探测精度,因而不再被观测到。在随后的时间延时 $t=1.9$ ns情况下,日冕仪图像同样呈现该趋势。在纳秒量级的时间延时下,等离子体长度变化不大,但强度逐渐减小。在达到延时最大值情况(6 ns),仍然能够观测到微弱的等离子体日冕仪成像信号。

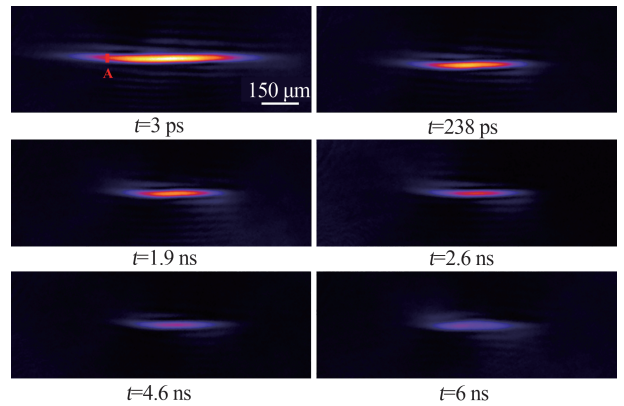


图3 不同时间延时下的日冕仪成像图
Fig. 3 Coronagraph imaging at different time delays

OVC系统观察到的等离子体的相位源于等离子体引入的折射率变化对等离子体横向宽度的积分:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_l n(x, y, z) dz$$

其中, l 为等离子体横向宽度。由于等离子体丝的折射率正比于自由电子的密度,因而观察到的等离子体成像随时间的演化反映了自由电子密度随时间的变化。为了探究空气等离子体的衰减动力学,给出了日冕仪成像强度随时间变化的实验结果,如图4所示。采样区域为如图3中的A所示,该区域包含了 3×14 个像素点。实验结果表明,等离子体的衰减明显地分为两个阶段,一个是快速衰减阶段(图4中的插图展示了刚开始150 ps范围内快速衰减过程的细节),一个是较慢的衰减阶段。对于这两个衰减过程,采用双指数 $I(t) = A_1 \cdot \exp(-t/\tau_1) + A_2 \cdot \exp(-t/\tau_2)$ 对其进行拟合^[32],其中 τ_1 、 τ_2 分别为两个衰减过程的特征时间, A_1 、 A_2 分别为两个衰减过程对应的权重因子。拟合曲线如图4中的实线所示,从中得到快速弛豫过程的特征时间为65 ps,慢速弛豫阶段的特征时间为810 ps。

空气等离子体中自由电子的衰减有多个途径,包括以下两个过程^[33]:自由电子与离子的复合过程以及自由电子在中性氧气分子上的附着过程。LEI Mingwei等^[32]通过计算电子与离子的碰撞速率估计了复合过程的时间尺度在亚纳秒量级。考虑到本工作的实验气压是其气压的100倍,可估算出本实验条件下电子与离子的复合特征时间为10 ps,与第一个快速弛豫过程的时间尺度处于同一数量级。另外,参考TZORTZAKIS S^[24]等在空气中观测到复合过程时间尺度约为125 ps的结论,考虑到其聚焦条件为松聚焦($f=2$ m),而本工作为紧聚焦($f=10$ cm),所以本工作中自由电子与离子的复合时间应该更短,小于125 ps。因此,可推断图4中第一个快速衰减阶段(65 ps)对应于自由电子与离子的复合过程。对于自由电子在中性氧气分子上的附着过程,TZORTZAKIS S^[24]以及ZIGLER V A^[33]等认为该过程为一较慢速过程,其典型时间尺度在1~10 ns量级。其原因主要在于该附着过程的发生以三体碰撞为主,需要第二个分子参与碰撞,因

而碰撞截面减小,碰撞速率降低,导致了相比于上述的复合过程,其衰减时间显著变长。因而认为图4中观察到的第二个较慢衰减过程(810 ps)源自于电子在中性氧气分子上的附着。也有研究者认为飞秒激光与原子分子作用除了产生等离子体之外,也会产生一些激发态^[34],激发态的寿命通常长于等离子体的寿命,这些激发态的产生也可能导致慢过程折射率的变化,但由于激发态分子或离子的浓度相比于等离子体的浓度较小,所以其对于等离子体折射率的贡献也应该较小。因此,实验测量中的慢过程应该主要反映等离子体浓度的变化。

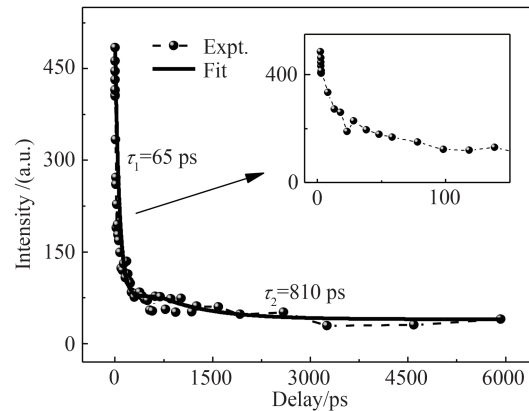


图4 6 ns范围内日冕仪成像强度随时间延时的变化

Fig. 4 Intensity of the coronagraph imaging as a function of time delay in the range of 6 ns

3 结论

本文将超快泵浦-探测手段和光学涡旋日冕仪技术结合,提出了时间分辨光学涡旋日冕仪技术(TOVC),并将该技术成功应用于对飞秒激光激发的空气等离子体的超快诊断。在对空气等离子体的超快诊断中,首先观测了空气等离子体在数个ps内的形成过程,发现空气等离子体的生成方向与激光的传播方向一致,且其长度逐渐变长直至完全形成。进一步地,本文探究了空气等离子体的衰减过程,通过增加泵浦-探测的时间延时,得到了一系列日冕仪成像强度逐渐减弱的图像。分析并拟合了图像某一区域的信号强度变化,得到双指数衰减的演化过程。对于等离子体的快速指数衰减,诊断其是等离子体中自由电子与正离子的复合过程。对于呈现为缓慢指数衰减的第二阶段,将其归因为电子与中性氧气分子的附着过程。

参考文献

- [1] QIU Xiaodong, LI Fangshu, ZHANG Wuhong, et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 208-212.
- [2] BISS D P, YOUNG WORTH K S, BROWN T G. Dark-field imaging with cylindrical-vector beams [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(3): 470-479.
- [3] CHAZOT C A, NAGELBERG S. Luminescent surfaces with tailored angular emission for compact dark-field imaging devices [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(5): 310-315.
- [4] ELIAS P Q, SEVERAC N, LUYSSSEN J M, et al. Improving supersonic flights with femtosecond laser filamentation [J]. *Science Advances*, 2018, 4(11): eaau5239.
- [5] GOMEZ-SARABIA C M, OJEDA-CASTANEDA J. Schlieren masks: square root monomials, sigmoidal functions, and off-axis Gaussians [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(12): 3589-3594.
- [6] 王宜政. 基于小波和自适应分数阶微分的图像增强方法研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [7] KASTLER A. Un système de franges de diffusion à grand contraste [J]. *Revue d'Optique, Théorique et Instrumentale*, 1950, 29: 307-314.
- [8] MARR D, HILDRETH E. Theory of edge detection [J]. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 1980, 207(1167): 187-217.
- [9] KHONINA S, KOTLYAR V, SHINKARYEV M, et al. The phase rotor filter [J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(5): 1147-1154.
- [10] SHARMA M K, JOSEPH J, SENTHILKUMARAN P. Selective edge enhancement using anisotropic vortex filter [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(27): 5279-5286.

- [11] CHEN Jun, CUI Xiangxia, XIAO Jing, et al. Research on image edge enhancement characteristics based on radial hilbert transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 483-486.
陈君, 崔祥霞, 肖静, 等. 基于径向希尔伯特变换的图像边缘增强特性研究 [J]. *光子学报*, 2011, 40(3): 483-486.
- [12] ZHOU Yi, FENG Shaotong, NIE Shouping, et al. Anisotropic edge enhancement with spiral zone plate under femtosecond illumination [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2641-2648.
- [13] LIU Shikai, YANG Chen, LIU Shilong, et al. Up-conversion imaging processing with field-of-view and edge enhancement [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044013.
- [14] HUO Pengcheng, ZHANG Cheng, ZHU Wenqi, et al. Photonic spin-multiplexing metasurface for switchable spiral phase contrast imaging [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(4): 2791-2798.
- [15] FURHAPTER S, JESACHER A, BERNET S, et al. Spiral phase contrast imaging in microscopy [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- [16] FOO G, PALACIOS D M, SWARTZLANDER G A. Optical vortex coronagraph [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3308-3310.
- [17] MAWET D, RIAUD P, ABSIL O, et al. Annular groove phase mask coronagraph [J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 633(2): 1191.
- [18] SERABYN E, MAWET D, BURRUSS R. An image of an exoplanet separated by two diffraction beamwidths from a star [J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 1018-1020.
- [19] SWARTZLANDER JR G A. The optical vortex coronagraph [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(9): 094022.
- [20] MAWET D, SERABYN E, LIEWER K, et al. Optical vectorial vortex coronagraphs using liquid crystal polymers: theory, manufacturing and laboratory demonstration [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1902-1918.
- [21] LIANG Qingqing, HUANG Xia, MOU Yanfei, et al. Optical vortex coronagraph imaging of a laser-induced plasma filament [DB/OL]. (2021-08-03) [2021-08-04]. <https://arxiv.org/abs/2108.01606v1>.
- [22] 张洪. 涡旋光轨道角动量的产生与检测技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [23] COUAIRON A, MYSYROWICZ A. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Physics Reports*, 2007, 441(2): 47-189.
- [24] TZORTZAKIS S, PRADE B, FRANCO M, et al. Time-evolution of the plasma channel at the trail of a self-guided IR femtosecond laser pulse in air [J]. *Optics Communications*, 2000, 181(1): 123-127.
- [25] LIU Jiansheng, DUAN Zuoliang, ZENG Zhinan, et al. Time-resolved investigation of low-density plasma channels produced by a kilohertz femtosecond laser in air [J]. *Physical Review E: Statistical Nonlinear Soft Matter Physics*, 2005, 72(2): 026412.
- [26] PAPAZOGLU D, TZORTZAKIS S. In-line holography for the characterization of ultrafast laser filamentation in transparent media [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(4): 041120.
- [27] RODRIGUEZ G, VALENZUELA A R, YELLAMPALLE B, et al. In-line holographic imaging and electron density extraction of ultrafast ionized air filaments [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(12): 1988-1997.
- [28] PAPEER J, MITCHELL C, PENANO J, et al. Microwave diagnostics of femtosecond laser-generated plasma filaments [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(14): 141503.
- [29] CHEN Shiyu, LIU Xiaolong, LU Xin, et al. Temporal evolution of femtosecond laser filament detected via magnetic field around plasma current [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32514.
- [30] YAO Jinping, ZENG Bin, CHU Wei, et al. Enhancement of third harmonic generation in femtosecond laser induced filamentation-comparison of results obtained with plasma and a pair of glass plates [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(3): 245-249.
- [31] LIU Yi, DURAND M, HOUARD A, et al. Efficient generation of third harmonic radiation in air filaments: A revisit [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(19): 4706-4713.
- [32] LEI Mingwei, WU Chengyin, LIANG Qingqing, et al. The fast decay of ionized nitrogen molecules in laser filamentation investigated by a picosecond streak camera [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2017, 50(14): 145101.
- [33] PAPEER J, GORDON D, SPRANGLE P, et al. Temporal evolution of femtosecond laser induced plasma filament in air and N₂ [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(24): 244102.
- [34] ZHANG Fangbo, LIU Zhaoxiang, YAO Jinping, et al. Spectrum-and time-resolved investigation of pre-excited argon atoms [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 063425