

文章编号: 1005-5630(2023)02-0069-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.002.009

飞秒激光诱导的空气等离子体冲击波探究

牟彦霏, 张岐源, 梁青青

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 一定强度的飞秒激光聚焦于空气能生成空气等离子体并诱导生成冲击波。为了观察该冲击波传播特性, 引入了超快时间分辨涡旋滤波成像技术, 并对观测到的冲击波动力学过程进行了分析。实验探测到泵浦能量为 1.5 mJ 的飞秒激光经过透镜聚焦到空气中产生等离子体空气冲击波, 分析了在 3~15 μ s 时间段冲击波的动态演化过程。结果表明, 飞秒激光等离子体空气冲击波在传输时以不对称的球形形状向外扩散, 且沿着激光传播方向的传播速度与背着激光传播方向的传播速度不同, 分别为 372 m/s 和 341 m/s。这一观察结果与传统的点爆炸模型的对称情形不同, 尝试对该不对称动力学过程进行了合理解释。

关键词: 超快时间分辨成像; 涡旋滤波; 空气等离子体; 冲击波

中图分类号: O 437 **文献标志码:** A

Investigation of air plasma shock waves induced by femtosecond laser

MOU Yanfei, ZHANG Qiyuan, LIANG Qingqing

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

Abstract: With a certain intensity, a femtosecond laser focusing in the air will generate an air plasma and induce a shock wave. In order to study the propagation process of the shock wave, an ultrafast time-resolved vortex filtering imaging technique is introduced in this paper, and the observed dynamic process of the shock wave is analyzed. The shock wave from air plasma was observed when pumped by a 1.5 mJ femtosecond laser focused into the air through a lens, and the dynamic evolution of the shock wave in the period from 3-15 microseconds was analyzed. The results show that the femtosecond laser plasma air shock wave diffuses outwards in an asymmetrical spherical shape, and the propagation velocity is different along the laser propagation direction and behind the laser propagation direction, which are 372 m/s and 341 m/s, respectively. This observation is different from the traditional point explosion model, namely the symmetric case. We give a reasonable explanation for this asymmetric dynamic process.

收稿日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(11904232, 12034013); 上海市教委创新计划项目(2017-01-07-00-07-E00007)

第一作者: 牟彦霏(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为超快非线性光学。E-mail: myanfei@163.com

通信作者: 梁青青(1981—), 女, 讲师, 研究方向为超快非线性光学。E-mail: qqliang@usst.edu.cn

Keywords: ultrafast time-resolved; vortex filter; air plasma; shock wave

引 言

近年来,随着飞秒激光技术的迅速发展,强激光诱导产生的冲击波被广泛应用,受到了人们的大量关注^[1-2]。2006年,King等^[3]发现冲击波产生的力可细化材料、降低材料表面粗糙度。2018年,Chen等^[4]发现,用冲击波来冲击纯镍表面,使其发生变形,能够增加材料的硬度和耐腐蚀性。此外,等离子体强空气冲击波也被广泛用来清洗硅片以及器件上的纳米粒子^[5-9],通过精准控制,可达到高精度且强有力的冲洗效果^[10]。2022年,Schaffer等^[11]通过固体中的TPa值和液体中的GPa值测量出了强冲击波的高压强度,并且提出了利用飞秒激光诱导的空气冲击波开发超高速发射装置的设计。

为了更好地拓展其应用,有必要对等离子体空气冲击波的形成原因、后续传输特性,尤其是各分段过程中的传输动力学进行研究。2011年,Mahdich等^[12]提出,等离子体形成的最初动力学过程主要发生在亚纳秒的时间尺度,即冲击波的产生是在100 ns的时间内开始,并持续传播数十微秒。2014年,Jhajj等^[13]的研究工作表明,冲击波在初始形成的高密度区域首先会在数十纳秒内快速膨胀,之后经过1~2 μs ,冲击波内压力会达到平衡,最后在毫秒的尺度内衰减。在此过程中,即使激光对等离子体的作用结束且等离子体不再吸收激光能量,冲击波的波前仍会在空气中继续传播,之后波阵面的峰值不断地下降,直到衰减消退为声波^[14-15]。2016年,Zhou等^[16]利用纳秒时间尺度的分辨方法,观察到在第182 ns之后,冲击波才会逐渐演化为球形。2021年,Rastegari等^[17]观察到紫外飞秒光聚焦产生的冲击波在微秒时间尺度上的演化过程。2008年,Thiyagarajan等^[18]利用阴影诊断法,探究了1 064 nm的红外光泵浦产生空气等离子体冲击波过程中的中性气体密度分布,为了解激光诱导等离子体的动力学过程提供了方法。

等离子体产生冲击波是热能转化为动能的一个过程,在热量向周围空气扩散的过程中,将会引起空气折射率的变化。等离子体产生的冲击波

的波阵面是高温高压以及高密度态的,在传播过程中,周围空气的压强、温度等因素都会发生突变^[19]。2022年,Koritsoglou等^[20]利用泵浦-探测显微成像技术,观察到了冲击波形成初期皮秒至纳秒时间尺度内的膨胀过程,并分析了该时间尺度内等离子体能量转换过程。本文测量了光丝后续在微秒时间尺度内演化过程,利用具有超快时间分辨的涡旋滤波成像方法观测到了后续空气冲击波的传输过程,获得了冲击波的半径随时间延时的变化情况,并计算了冲击波前向和背向的传输速度。本文首次运用涡旋滤波成像技术探测到冲击波在3~15 μs 时间尺度内的演化过程。

1 超快时间分辨涡旋滤波成像装置

采用超快时间分辨涡旋滤波成像法,实验光路由泵浦和探测两部分组成。用于泵浦的飞秒激光由美国相干公司的钛蓝宝石激光器输出,激光中心波长为796 nm,脉冲宽度为35 fs,重复频率为1 kHz,偏振方向为水平,全能量为11 mJ,经过分束镜后用来产生冲击波的能量为1.5 mJ。飞秒激光在空气中传输并经透镜聚焦时,因峰值功率大于自聚焦临界功率,在克尔自聚焦效应和等离子体散焦效应共同作用下,会在透镜后生成细长的等离子体通道,即光丝。实验中,用于聚焦飞秒激光的透镜焦距为7.5 cm,更紧密的聚焦能产生更高的等离子体密度,生成更强的冲击波。

探测光路光源采用的是水平线偏振的氩氦激光(型号为HRS015B,波长632.8 nm)。氩氦激光先经过扩束器成为准直平行的大光斑,随后经过孔径光阑滤波后,选取中心光斑均匀的地方作为探测光。利用光丝对探测光的微小相位改变,通过由2个焦距均为30 cm的透镜组成的4f成像装置,在其频谱面放置拓扑荷数为1的涡旋半波片(型号为VR1, LBTEK-633 nm),实现微结构的边缘增强,出射后成像于增强电荷耦合器件(intensified charge coupled device, ICCD)(型号为iStar 334T, Andor)。ICCD放置于透镜2的成像面处,实验装置如图1所示。

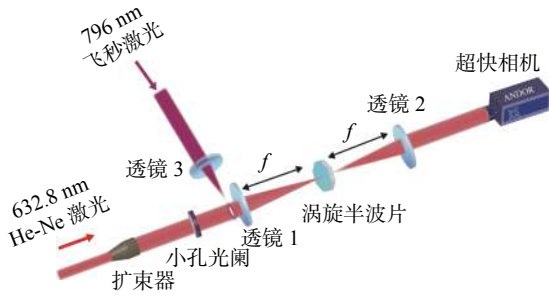


图 1 探测飞秒激光等离子体空气冲击波的时间分辨涡旋滤波实验装置

Fig. 1 A time-resolved vortex filter for detecting femtosecond laser plasma air shock wave

观察飞秒激光等离子体丝诱导产生的空气冲击波时, 利用高速像增强型 ICCD 进行时间分辨。ICCD 自带时间闸门, 像素单元尺寸为 $13\ \mu\text{m}$, 门宽小于 $2\ \text{ns}$, 即纳秒之上的时间尺度事件都可以被测到, 可实现对冲击波时间分辨成像的探测。

通过在 $4f$ 系统的频谱面上放置 VR1 滤波元件, 实现了边缘增强的涡旋滤波成像。2011 年, Maurer 等^[21] 发现经过拓扑荷数为 1 的涡旋半波片滤波后, 探测样品成像时会出现边缘增强的效果, 该成像技术能够灵敏地探测微弱相位型样品的边缘结构。图 2 所示为该滤波技术的边缘增强效果。图 2(a) 所示为一圆孔在无滤波条件下的成像, 该图呈现出圆孔原本的样子。而如果对其进行拓扑荷数为 1 的涡旋滤波, 则圆孔成像如图 2(b) 所示, 边缘呈现增强, 中间平坦区域因为无结构或无边缘而呈现暗场。Maurer 等证明了该一阶涡旋滤波成像边缘增强的原因是滤波技术实现了原图像的一阶求导, 从而导致了具有一阶导数的边缘呈上述增强的效果。对于圆孔而言, 中间平坦区域一阶求导为零, 因而光强分布为零, 而在小孔的边缘因具有较大的一阶导数

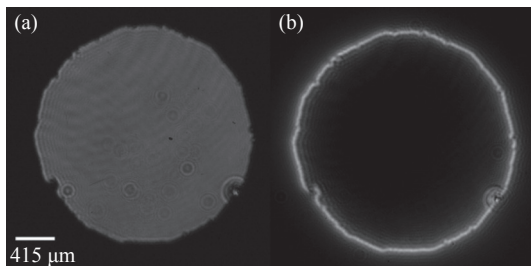


图 2 圆孔的涡旋滤波边缘增强成像

Fig. 2 Edge enhancement imaging with vortex filtering for circular holes

值, 所以在该处具有较强的光强分布。本文运用该技术实现了对弱相位物体空气冲击波的灵敏探测。

2 冲击波的超快时间分辨实验结果及动力学过程分析

实验中, 通过调节 ICCD 的门宽和步长, 设置合适的曝光时间, 能够观测到冲击波在不同时间延时下的图像。图 3 所示为观测到的 $3\sim 11\ \mu\text{s}$ 间的冲击波图像, 其中激光传输方向由左向右, ICCD 设置的探测步长为 $1\ \mu\text{s}$, 门宽为 $800\ \text{ns}$, 积分时间为 $2\ \text{s}$ 。图 3 中, 冲击波的波前面清晰可见, 中间最亮的部分是飞秒激光聚焦产生的等离子体。如果将等离子体最清楚明亮的时刻定义为时间零点, 则随着 ICCD 的逐步采集, 可观察到冲击波的波阵面是以中心为原点逐渐向外膨胀, 且半径逐渐变大。

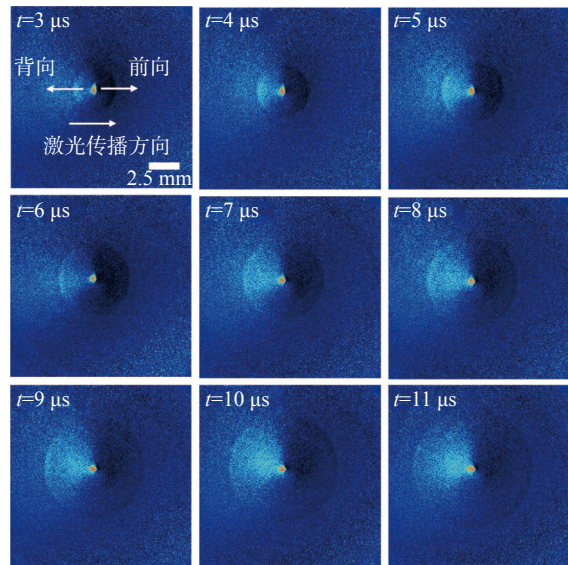


图 3 涡旋滤波边缘增强成像技术探测到的不同时间延时下的空气冲击波

Fig. 3 Air shock wave under different time delay detected by vortex filtering edge enhancement

此外, 在波阵面膨胀的过程中, 还观测到冲击波沿着光传输方向和背着光传输方向的膨胀速度不同, 即冲击波是以不对称的形状向外扩散。图 4(a) 所示为左侧逆着激光传输的冲击波波阵面的移动情况, 其中红色的虚线框代表的是冲击

波波阵面，相比于图 4(b)所示的右侧沿着激光传输方向的冲击波，在相同的时间延时范围内，右侧的冲击波波阵面移动的距离要大于左侧。分析导致这种现象的主要原因是：前向产生的激光等离子体能够继续吸收后续经过该区域的等离子体脉冲激光的能量，从而使得此部分沉积的能量增加，继而在激光的支持作用下，使得其产生的冲击波膨胀速度变快；而在左侧背向激光的传输方向上，由于激光先于等离子体经过沉积区域，

等离子形成后便无法再吸收后续激光能量，从而速度低于右侧前向冲击波的膨胀速度。这一分析以卞保民等^[22]在 2002 年提出的相关观点为理论依据，即冲击波膨胀速度与诱导其产生的飞秒激光能量相关，激光能量越大则沉积区域能量越大，继而冲击波初始膨胀的速度越大。这也与 Bae 等^[23]在 2021 年观测到的激光诱导等离子体产生的空气冲击波初期以椭球形形状演化过程相一致。

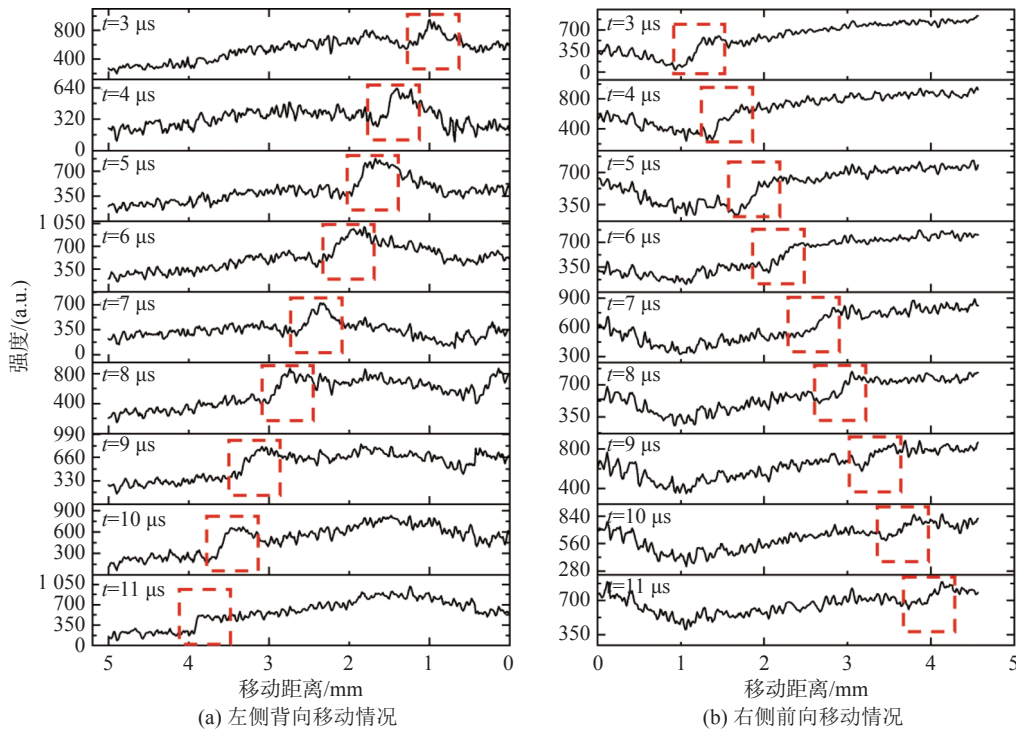


图 4 空气等离子体冲击波波阵面

Fig. 4 Movement of the air plasma shock wave front

为了进一步研究飞秒激光等离子体空气冲击波前向与背向的扩散情况，测量了冲击波的半径随时间变化的曲线图，如图 5 所示。其中实线分别为前向和背向冲击波的移动情况，两条虚线为线性拟合结果。实验中的数据为取多次的平均结果。由图 5 可知，冲击波的半径与时间延时之间接近于线性关系，这与 Chiba 等^[24]在 2017 年观测到的结果一致，即在膨胀末期冲击波的半径与时间延时之间存在着线性变化关系。由冲击波扩散半径与时间的线性关系，拟合得到左右两侧的直线斜率为分别为 341 m/s 和 372 m/s。2002 年，卞保民等^[22]提出了点爆炸冲击波的传播模型，指出在前期，冲击波的波前以近乎不变的速度

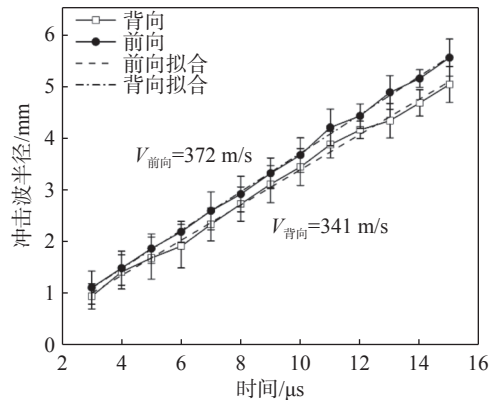


图 5 冲击波扩散半径随时间的变化

Fig. 5 The diffusion radius of the shock wave as a function of time

度迅速膨胀。在本研究中, 与点爆炸产生的冲击波不同的是: 由于飞秒激光丝等离子体通道的形状及能量分布的特殊性, 其产生的空气冲击波不仅与初始光丝的形貌相关, 即冲击波在初期以非对称球形形状向外扩展; 而且, 由于光丝细长通道的特性, 导致前向与背向等离子体沉积能量的各项异性, 前向沉积能量高, 背向沉积能量低, 从而导致了所生成的冲击波前向速度快, 背向速度慢。本文对传统点爆炸模型进行了补充, 对于非点源爆炸产生的冲击波更具有普适性。

3 结 论

本文将时间分辨涡旋滤波成像技术与超快探测技术相结合, 观察到了冲击波的动力学演化过程。在对冲击波进行诊断的过程中, 观察到了冲击波前沿的移动情况, 并对其半径与时间进行了拟合, 算出前向与背向的冲击波的速度大小: 前向约为 372 m/s; 背向约为 341 m/s。冲击波在两侧以不同速度扩散的原因在于沉积能量的各向异性分布, 分析了沉积能量各向异性分布的根本原因, 并对传统点爆炸空气冲击波模型做了补充。不同于纳秒激光器产生的冲击波, 使用飞秒激光只需要 1 mJ 左右的能量就可达到与纳秒激光器相同压力的冲击波, 这为冲击波在更小空间尺度的应用, 更高精度的操控上提供了可能性。

参考文献:

- [1] TAO H Y, LIN J Q, HAO Z Q, et al. Formation of strong light-trapping nano- and microscale structures on a spherical metal surface by femtosecond laser filament[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(20): 201111.
- [2] ZHIGILEI L V. Dynamics of the plume formation and parameters of the ejected clusters in short-pulse laser ablation[J]. *Applied Physics A*, 2003, 76(3): 339 – 350.
- [3] KING A, STEUWER A, WOODWARD C, et al. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2006, 435-436: 12 – 18.
- [4] CHEN L, REN X D, ZHOU W F, et al. Evolution of microstructure and grain refinement mechanism of pure nickel induced by laser shock peening[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2018, 728: 20 – 29.
- [5] MINSIER V, PROOST J. Shock wave emission upon spherical bubble collapse during cavitation-induced megasonic surface cleaning[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, 15(4): 598 – 604.
- [6] JANG D, PARK J G, KIM D. Enhancement of airborne shock wave by laser-induced breakdown of liquid column in laser shock cleaning[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(7): 073101.
- [7] KIM T H, BUSNAINA A, PARK J G, et al. Nanoscale particle removal using wet laser shockwave cleaning[J]. *ECS Journal of Solid State Science & Technology*, 2012, 1(2): 70 – 77.
- [8] LEE S H, PARK J G, LEE J M, et al. Si wafer surface cleaning using laser-induced shock wave: a new dry cleaning methodology[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 169-170: 178 – 180.
- [9] KIM J S, BUSNAINA A A, PARK J G. Effect of laser shock wave cleaning direction on particle removal behavior at trenches[J]. *ECS Transactions*, 2009, 25(5): 257 – 262.
- [10] KUDRYASHOV S I, ALLEN S D. Removal versus ablation in KrF dry laser cleaning of polystyrene particles from silicon[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(9): 5159 – 5162.
- [11] SCHAFFER C B, NISHIMURA N, GLEZER E N, et al. Dynamics of femtosecond laser-induced breakdown in water from femtoseconds to microseconds[J]. *Optics Express*, 2002, 10(3): 196 – 203.
- [12] MAHDIEH M H, NIKBAKHT M, SOBHANI M. Shock wave driven by high intensity nanosecond laser pulse in atmospheric air and 2-D determination of refractive index variations of hot core air[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(19): 4828 – 4835.
- [13] JHAJJ N, ROSENTHAL E W, BIRNBAUM R, et al. Demonstration of long-lived high-power optical waveguides in air[J]. *Physical Review X*, 2014, 4(1): 011027.
- [14] 单肖宁, 王媛伦. 激光诱导等离子体冲击波的理论研究 [J]. *中国战略新兴产业*, 2017(24): 132.
- [15] TAYLOR G I. The formation of a blast wave by a very intense explosion I. Theoretical discussion[J]. *Proceedings of the Royal Society A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1950, 201(1065): 159 – 174.
- [16] ZHOU Q, QIU R, JIANG Y, et al. Ultra-fast diagnosis

- of shock waves and plasma at front and rear surfaces in the bulk of fused silica induced by an Nd: YAG pulse laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5): 051402.
- [17] RASTEGARI A, DIELS J C. Investigation of UV filaments and their applications[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(6): 060803.
- [18] THIYAGARAJAN M, SCHARER J. Experimental investigation of ultraviolet laser induced plasma density and temperature evolution in air[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(1): 013303.
- [19] GUTHIKONDA N, MANIKANTA E, CHELIKANI L, et al. Interaction of two counterpropagating laser induced plasmas and shock waves in air[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(2): 023107.
- [20] KORITSOGLU O, LOISON D, UTEZA O, et al. Characteristics of femtosecond laser-induced shockwaves in air[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 37407 – 37415.
- [21] MAURER C, JESACHER A, BERNET S, et al. What spatial light modulators can do for optical microscopy[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 81 – 101.
- [22] 卞保民, 杨玲, 陈笑, 等. 激光等离子体及点爆炸空气冲击波波前运动方程的研究 [J]. *物理学报*, 2002, 51(4): 809 – 813.
- [23] BAE J, BYUN H, YOON T, et al. Novel calibration-free seedless velocimetry using laser-induced shockwave[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 126: 110384.
- [24] CHIBA R, ISHIKAWA Y, HASEGAWA J, et al. Time evolution of laser-ablation plumes and induced shock waves in low-pressure gas[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(6): 063520.

(编辑: 李晓莉)