

引用格式: HUANG Fengqin, SHEN Tianlun, SI Jinhai, et al. Temporal-spatial Dynamics of Femtosecond Time Resolved Plasma in Femtosecond Laser Induced Microstructure(Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650104

黄凤勤, 沈天伦, 司金海, 等. 飞秒激光诱导微结构中飞秒时间分辨等离子体的时空动力学过程(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(6):0650104

飞秒激光诱导微结构中飞秒时间分辨等离子体的 时空动力学过程(特邀)

黄凤勤, 沈天伦, 司金海, 陈涛, 侯洵

(西安交通大学 电子科学与工程学院 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 利用飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像技术研究了不同数值孔径显微物镜聚焦的单脉冲飞秒激光诱导熔融石英微结构中等离子体的瞬态时间-空间演化特性及瞬态电子密度空间分布与激光诱导微结构的联系。实验结果表明显微物镜聚焦的飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度随延时的增加先增大后逐渐减小。当显微物镜的数值孔径为 0.45 时, 飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度的空间位置随延时的增加变化不大, 基本都在非线性焦点处, 激光在样品中诱导的微结构是点状的; 当显微物镜的数值孔径为 0.3 时, 飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度的空间位置随延时的增加逐渐向样品内部移动, 激光诱导的微结构是长条状的。此外, 不同数值孔径显微物镜聚焦飞秒激光在样品中诱导最大瞬态电子密度的空间位置与激光诱导微结构的位置一致, 这说明飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像可用于超快激光微加工过程的在线检测, 可为超快激光诱导材料微结构的定向调控及加工参数优化提供参考。

关键词: 飞秒激光; 泵浦探测阴影成像; 等离子体; 微纳加工; 数值孔径

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215006.0650104

Temporal-spatial Dynamics of Femtosecond Time Resolved Plasma in Femtosecond Laser Induced Microstructure(Invited)

HUANG Fengqin, SHEN Tianlun, SI Jinhai, CHEN Tao, HOU Xun

(Shaanxi Key Lab of Information Photonic Technique, School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Temporal-spatial evolutions of transient plasma in single pulse femtosecond (fs) laser induced microstructure in fused silica were investigated using fs time-resolved pump-probe shadowgraphy. The relation between the spatial distribution of transient electron density and the distribution of fs laser-induced microstructure in fused silica were also studied. In this study, the fs laser was focused by two kinds of microscope objectives with different Numerical Aperture (NA). The results showed that the transient peak electron density induced by focused fs laser was increased and then decreased as delay time of probe beam increased. When the NA of the microscope objective was 0.45, the spatial position of transient peak electron density induced by fs laser did not moved as delay time increased, which basically kept at the nonlinear focus. The fs laser-induced microstructure in the sample was punctate. When the NA of the

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2017YFB1104600), 陕西省重点研发计划项目 (No. 2017ZDXM-GY-120), 航空科学基金 (No. 20140870002)

第一作者: 黄凤勤 (1990—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为飞秒时间分辨微加工机理及其应用研究。Email: hfq4117005070@stu.xjtu.edu.cn

导师(通讯作者): 司金海 (1960—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为超快光子技术。Email: jinhaisi@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-14; **录用日期:** 2021-06-09

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

microscope objective was 0.3, the spatial position of transient peak electron density induced by fs laser moved from the sample surface to the inside of the sample as delay time increased. The fs laser-induced microstructure in the sample was long strips. In addition, we found that the spatial position of fs laser-induced maximum transient electron density was consistent with the position of laser-induced microstructure when fs laser was focused by the two different microscope objective. Those results imply that fs time-resolved pump-probe shadowgraphy may be used for online monitoring fs laser processing process, which can provide references for directional control of ultrafast laser-induced material microstructure and optimization of machining parameters.

Key words: Femtosecond laser; Pump-probe shadowgraphy; Plasma; Micro-nano machining; Numerical aperture

OCIS Codes: 060.2340; 320.7160; 350.5400; 220.4000; 230.3990

0 引言

飞秒激光诱导透明介质微纳结构具有广泛应用,比如光栅和光波导的制备^[1]、材料的隐形切割^[2]、光存储^[3]等。由于飞秒激光诱导透明介质微纳结构主要基于非线性效应,不同波长、脉冲宽度诱导材料结构改变的机制也不相同。例如:光学着色、折射率变化、微孔洞和微裂纹^[4]。此外飞秒激光成丝效应对激光诱导微结构也有重要影响。飞秒激光成丝是由克尔自聚焦、等离子体自散焦两者的动态平衡决定的。飞秒激光诱导材料微结构过程中总伴随等离子体产生,而等离子体影响着飞秒激光传输及精确聚焦。因此,表征飞秒激光与材料中电子相互作用过程中局域瞬态自由电子等离子体动力学过程对于理解飞秒激光微纳加工机理具有重要意义。

飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像^[5]广泛地用于研究飞秒激光与透明材料相互作用中自由电子等离子体时间-空间演化动力学过程。MAO Xianglei等^[6]利用飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像研究了单脉冲飞秒激光在硼硅酸盐玻璃中诱导等离子体的时间-空间演化特性,并给出不同能量泵浦光在样品中诱导等离子体的阴影分布。SUN Quan等^[7]利用泵浦探测阴影成像研究了单脉冲飞秒激光在熔融石英中诱导等离子体的阴影分布,并结合干涉成像得到电子的碰撞时间约为1.7 fs及电子密度的大小约在 10^{19} cm^{-3} 量级。PAN Changji等^[8]利用双色泵浦探测阴影成像研究了单脉冲飞秒激光在熔融石英中诱导等离子体的时间-空间演化特性,并发现熔融石英中自由电子弛豫时间与电子密度呈反比例关系。上述报道主要研究了飞秒激光在材料中未诱导出微结构时的等离子体动力学过程,而飞秒激光诱导材料产生微结构过程中等离子体超快动力学过程的研究对于理解飞秒激光微纳加工的机理更有意义。WANG Feifei等^[9]利用泵浦探测阴影成像技术研究了多脉冲飞秒激光烧蚀熔融石英表面过程中,前一个飞秒激光脉冲在介质中诱导的弹坑结构对后续脉冲能量分布的影响。GAWELDA W等^[10]利用飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像技术揭示了飞秒激光在掺杂磷酸盐玻璃中写入波导结构时,可以通过最小化光束成丝和焦前耗尽效应来改善激光能量沉积的空间分布。

本文利用飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像技术研究了显微物镜聚焦的单脉冲飞秒激光在熔融石英中传输时诱导等离子体的瞬态时间-空间演化特性及瞬态电子密度空间分布与激光诱导微结构的联系。通过分析得到瞬态峰值电子密度及其所在空间位置随延时的演化规律,及不同数值孔径显微物镜聚焦的飞秒激光在样品中诱导自由电子等离子体分布与激光诱导微结构分布的联系。

1 实验装置

飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像的实验装置如图1所示。掺钛蓝宝石飞秒激光器(Femtosecond Laser)发出的中心波长为800 nm、重复频率为1 kHz、单脉冲能量为3.5 mJ的水平偏振的激光脉冲经机械光学斩波器(Chopper, MC1F10, Thorlabs)斩波,重复频率降低到0.5 kHz。随后,飞秒激光由光分束器(Beam Splitter, BS)分为泵浦光(Pump)和探测光(Probe)。在泵浦光路中加入 $\lambda/2$ 波片和格兰棱镜(Glan Prism, GP)组合调节泵浦光能量,其中格兰棱镜GP的偏振轴调为水平方向。泵浦光由显微物镜(Microscope Objective, MO_1)从样品(Sample)侧面聚焦到样品内部。样品是一块50 mm×5 mm×2 mm的条形熔融石英,泵浦光入射面及探测光经过面抛光。样品被安装在计算机程序控制的3D移动平台上,并以足够高的速

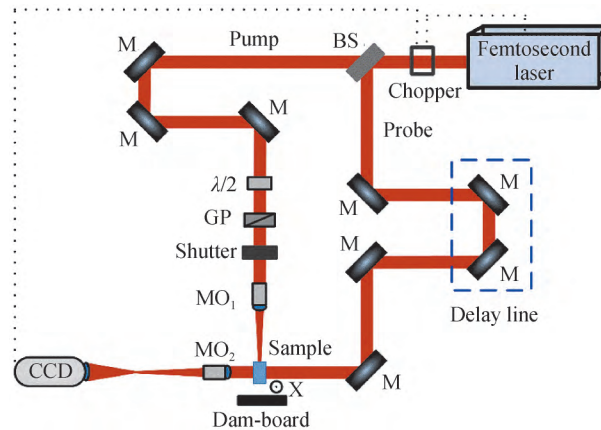


图1 飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像的装置示意图

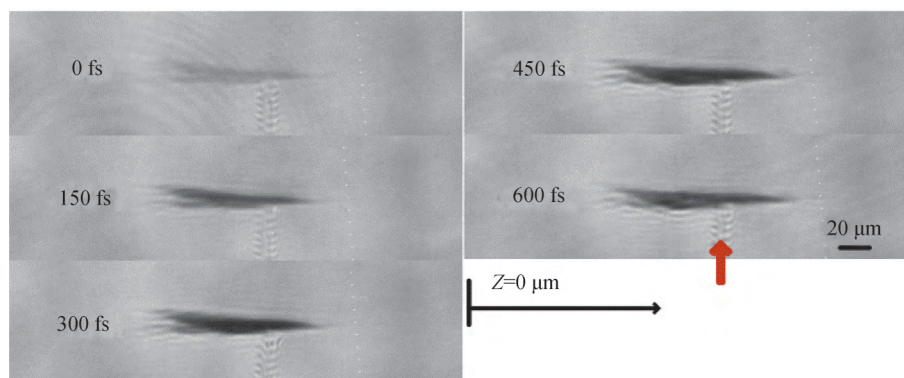
Fig. 1 Schematic diagram of the femtosecond time-resolved pump-probe shadowgraphy

度平行于 x 方向移动,确保每个泵浦光脉冲在样品中的辐照区域无重叠。探测光经光反射镜(Mirror,M)、光延迟线(Delay line)后垂直入射到样品,再由另一个显微物镜(Microscope Objective, $10\times$, $NA=0.3$, Nikon, MO_2)将透过样品的探测光成像在电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)上。探测光路的延迟线由安装在计算机程序控制的1D移动平台上的两个反射镜(M)组成,可以精确实现探测光和泵浦光相对延时的调节。同时,探测光能量足够低,以确保样品不会被改性。实验中使用的斩波器具有触发与同步功能。由飞秒激光光源输出一路同步信号触发斩波器,同时斩波器控制器可输出信号触发CCD,实现CCD拍照与激光脉冲同步。当探测光通过样品时,泵浦光激发的自由电子等离子体吸收探测光,因此有等离子体的区域在图像中表现为阴影。

2 实验结果及分析

首先研究数值孔径为0.45显微物镜(Microscope Objective, $20\times$, $NA=0.45$, Nikon, MO_1)聚焦的飞秒激光在样品内传输时诱导等离子体的演化过程。泵浦光从熔融石英样品侧面聚焦在样品表面下约 $500\mu\text{m}$,泵浦能量为 $16.0\mu\text{J}$ 。CCD记录的不同延时等离子体分布的阴影图像如图2所示。泵浦光的传输方向定义为 Z 方向,即图中黑色箭头所示的方向。为方便起见,把各图像最左边定义为 $Z=0\mu\text{m}$,将只有微弱等离子体出现在图像中的延时定义为 0fs 。从图2可以看出飞秒激光在样品内诱导等离子体分布沿激光传输方向均呈锥状。随着延时的增加,图像中等离子体区域的阴影强度先增强后减弱。图像中阴影强度变化在一定程度上反映了泵浦光强的变化。在图像中可以明显观察到前泵浦光脉冲在样品中诱导的微结构,说明聚焦后泵浦光强已经达到材料的破坏阈值。图中红色箭头所示的位置为微结构所在的位置。

同时,为了计算探测光透过率以及消除探测光本身分布不均匀的影响,先用CCD记录样品无泵浦光辐

图2 $16.0\mu\text{J}$ 飞秒激光时在熔融石英中诱导等离子体的时间分辨图像Fig. 2 Time-resolved images of plasma induced by $16.0\mu\text{J}$ femtosecond laser in fused silica

射时的图像作为参考图像,再记录某延时下泵浦光作用样品时探测光透过等离子体所成的时间分辨图像。将某延时下的时间分辨图像与参考图像相除,可以获得该延时下不同位置处探测光透过率 T 。延时为 300 fs 的时间分辨图像与其对应的透过率分布图像分别如图 3(a) 和 3(b) 所示。在透过率图像中可以明显观察到等离子体分布。

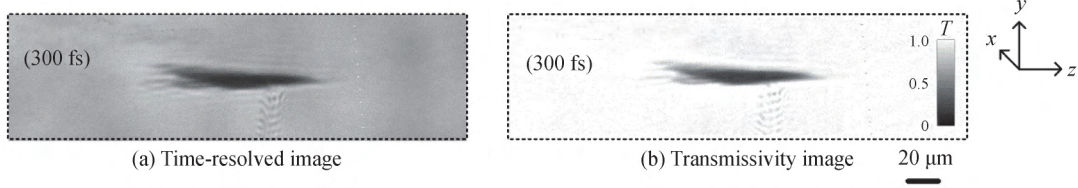


图3 延时为 300 fs 的时间分辨图像和相应的透过率分布图像

Fig. 3 Time-resolved image at a delay time of 300 fs, and its corresponding transmissivity image

探测光通过等离子体区域时会发生吸收、反射和折射。考虑到自由电子等离子体沿泵浦光传输方向具有柱对称性,穿过等离子体区域轴线的探测光入射角为零,研究等离子体轴线上的等离子体分布时可忽略等离子体对探测光的折射效应。等离子体对探测光的反射是微不足道的^[11],也可忽略反射效应。只考虑等离子体对探测光的吸收,则探测光中心区域的光强 I_t 为^[7]

$$dI_t/dx = -\alpha I_t \quad (1)$$

对式(1)积分,可得

$$-\ln T = \int \alpha dx \quad (2)$$

式中, T 为等离子体轴线上探测光的瞬态透射率, x 为沿探测光传输方向等离子体的长度, α 为瞬态吸收系数。

进一步,可以计算瞬态平均吸收系数的大小为

$$\alpha_{\text{aver}} = -(\ln T)/x_{\text{FWHM}} \quad (3)$$

式中, α_{aver} 为瞬态平均吸收系数, x_{FWHM} 为沿探测光传输方向等离子体长度的半高全宽(x_{FWHM} 的值由瞬态透过率图像得到, 并且 $x_{\text{FWHM}} = y_{\text{FWHM}}$)。

由实验中测得的等离子体轴线上某位置的瞬态透过率,利用式(3)可以得到该位置处的瞬态平均吸收系数。数值孔径 0.45 的显微物镜聚焦时, 16 μJ 泵浦光在样品中传输时非线性焦点处瞬态平均吸收系数随延时的演化如图 4 所示。从图 4 可以看出瞬态平均吸收系数随延时的增加先增加后减小,其演化过程的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)约为 400 fs。这说明实验中所探测到的电子演化是一个超快弛豫过程。熔融石英等离子体可能通过自陷激子及其它超快过程弛豫^[13-14]。由参考文献[15]可知,自陷激子在飞秒时间尺度内弛豫为电子缺陷,其典型的吸收峰在 2.8 eV 和 1.9 eV。因此,自陷激子形成的电子缺陷对 800 nm 波长没有吸收,利用 800 nm 的探测光无法直接探测到自陷激子的弛豫过程及其分布。本实验

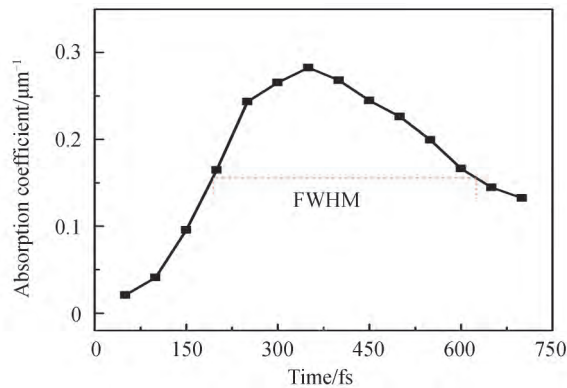


图4 非线性焦点处瞬态平均吸收系数随延时的演化

Fig. 4 The evolution of the average transient absorption coefficient at nonlinear focus

中所探测的是纯自由电子等离子体的空间分布和弛豫过程。

由于

$$\alpha = \sigma n_e \quad (4)$$

式中, n_e 为等离子体轴线上瞬态电子密度, σ 为 Drude 模型^[12] 中逆韧致辐射的吸收截面。

因此可以得到,瞬态电子密度大小为

$$n_e = -(\ln T) / \alpha x_{\text{FWHM}} \quad (5)$$

当只考虑等离子体轴线上的电子密度分布时,利用式(5)可以由实验中测得的等离子体轴线上某位置的瞬态透过率得到该位置处的瞬态电子密度。进一步地,由每一延时下等离子体轴线上探测光瞬态透射率的空间分布可以推导出每一延时下等离子体轴线上瞬态电子密度的空间分布。当显微物镜的数值孔径为 0.45, 泵浦能量为 16.0 μJ , 延时分别为 150 fs、300 fs、450 fs 和 600 fs 时, 沿等离子体轴线上瞬态电子密度的空间分布如图 5(a) 所示。从图 5(a) 可以观察到所有延迟下等离子体轴线上瞬态电子密度随泵浦光传输深度的增加先增加后减小。将每个延时的最大电子密度定义为瞬态峰值电子密度。由每一延时电子密度的空间分布可以获得每一延时瞬态峰值电子密度及其所在的空间位置。显微物镜的数值孔径为 0.45, 泵浦能量为 16.0 μJ , 飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度随延时的演化如图 5(b) 中黑线所示, 可以看出瞬态峰值电子密度随延时的增加先增大后逐渐减小, 并在延时为 350 fs 时达到最大瞬态电子密度, 其值约为 $1.12 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度所在的空间位置随延时的演化如图 5(b) 中红线所示, 可以看出瞬态峰值电子密度的空间位置随延时的增加开始几乎保持在非线性焦点处, 550 fs 后逐渐向样品内部移动, 700 fs 时移动了约 25 μm 。

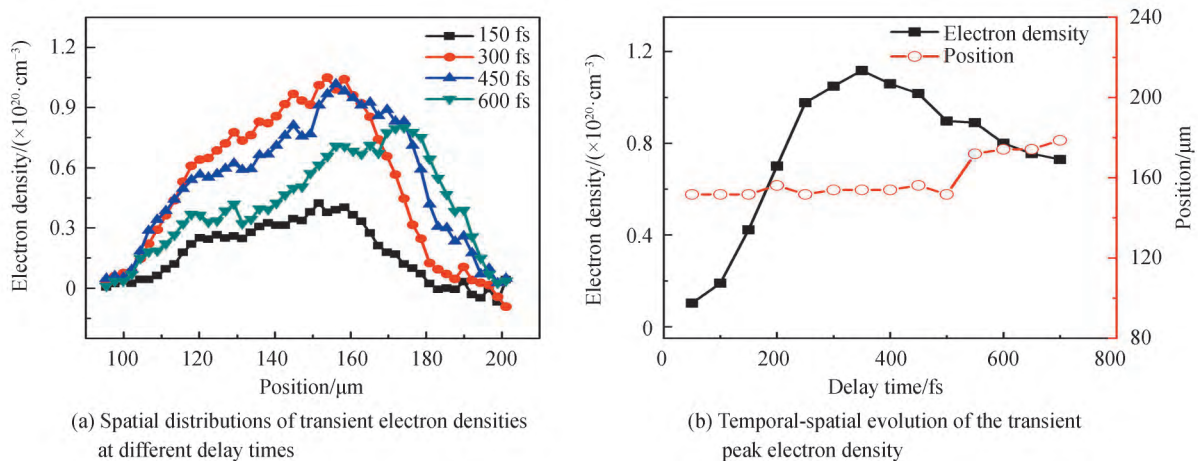


图5 显微物镜聚焦的飞秒激光在熔融石英中诱导瞬态电子密度的时间-空间分布

Fig. 5 Temporal-spatial distribution of the transient electron density induced by focused femtosecond laser in the fused silica

研究显微物镜的数值孔径为 0.45 时, 不同能量泵浦光 (0.8, 1.5, 2.0, 4.0, 8.0 和 16.0 μJ) 在样品中诱导等离子体的演化。CCD 记录的不同能量泵浦光诱导等离子体时间分辨图像的延时范围从 0 fs 到 700 fs。图 6 (a) 展示了延时为 300 fs 时不同能量泵浦光在样品中诱导等离子体的时间分辨图像。可以看出, 不同能量泵浦光在样品内诱导等离子体分布沿激光传输方向均呈锥状。此外, 随着泵浦能量的增加等离子体的覆盖范围逐渐增大。可以看出 4.0, 8.0 和 16.0 μJ 泵浦光脉冲在样品中诱导的微结构, 并且随着泵浦能量的增加飞秒激光诱导的微结构越来越明显, 其中红色箭头所示的位置为微结构所在的位置。图 6(b) 展示的是不同能量泵浦光在样品中诱导微结构在 50 $\times$ 显微镜 (NA=0.5, Olympus) 下的成像结果。由图 6(b) 可以看出不同能量泵浦光诱导微结构的形貌均为点状, 并且随着泵浦能量的增加点状微结构越来越明显。

图 7(a) 和图 7(b) 是显微物镜的数值孔径为 0.45 时, 不同能量泵浦光 (0.8, 1.5, 2.0, 4.0, 8.0 和 16.0 μJ) 在样品中诱导瞬态峰值电子密度及其所在空间位置随延时的演化。各能量泵浦光诱导的瞬态峰值电子密度随延时的增加均先增大后减小, 这与 16.0 μJ 的趋势一致。0.8, 1.5, 2.0, 4.0, 8.0 和 16.0 μJ 达到最大瞬态电子密度的延时分别为 400 fs, 400 fs, 400 fs, 250 fs, 350 fs, 和 350 fs, 其值分别为 5.02×10^{19} , 7.73×10^{19} , $9.75 \times$

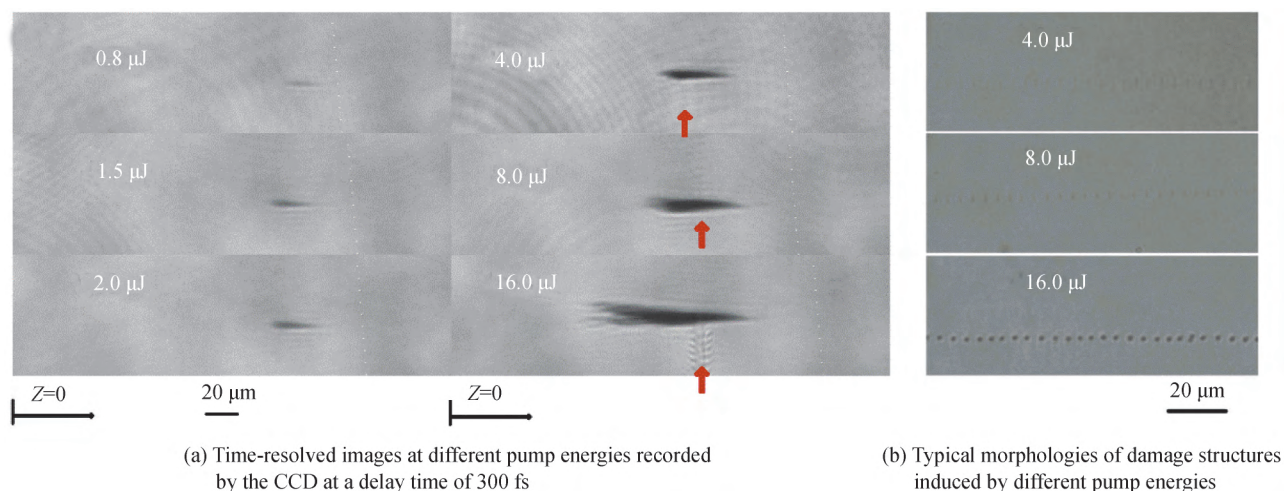


图6 不同能量泵浦光在样品中诱导等离子体的时间分辨图像和飞秒激光诱导微结构的典型形貌
Fig. 6 Time-resolved images of plasma induced by different pump energies and typical morphologies of microstructures

10^{19} , 1.07×10^{20} , 1.10×10^{20} 和 $1.12 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。瞬态峰值电子密度的空间位置随延时的增加基本变化不大, 只有泵浦能量为 $16.0 \mu\text{J}$ 的瞬态峰值电子密度的空间位置在 550 fs 之后向样品内部移动了约 $25 \mu\text{m}$ 。这可能是由于 $16.0 \mu\text{J}$ 泵浦能量较大, 在非线性焦点之后仍有较高能量并发生自聚焦, 因此观察到瞬态峰值电子密度的空间位置向非线性焦点后移动的现象。图 7(c) 展示了最大瞬态电子密度随泵浦能量的变化。随着泵浦能量的增加, 最大瞬态电子密度先增大, 在 $4.0 \mu\text{J}$ 开始逐渐饱和。这是因为等离子体自散焦效应局部平衡了光克尔效应, 从而使最大瞬态电子密度达到饱和^[16]。由于从 $4.0 \mu\text{J}$ 开始, 样品中出现激光诱导的微结构。因此, $4.0 \mu\text{J}$ 的最大瞬态电子密度 $1.07 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 与材料的损伤的阈值电子密度接近, 这和 COUAIRON A 等^[16]测得的电子密度在同一个量级。

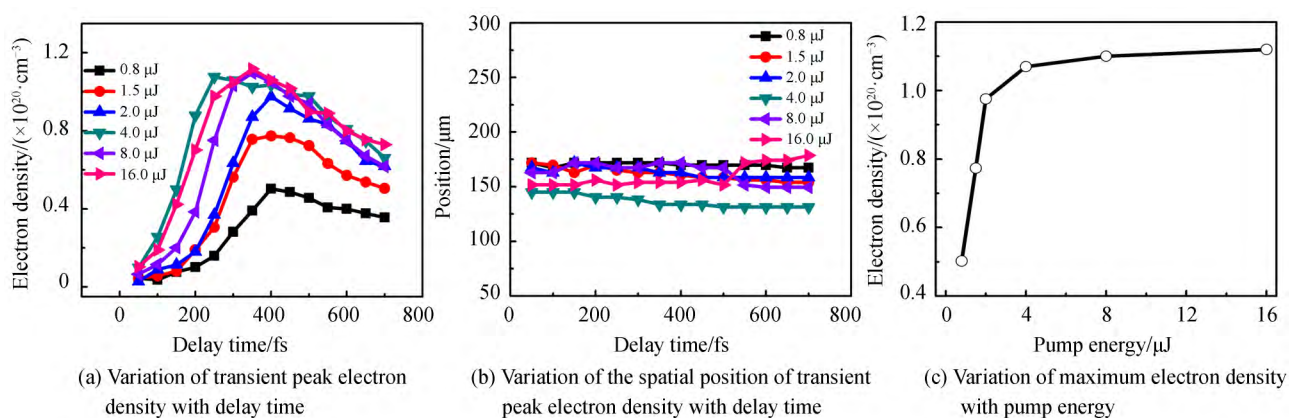


图7 不同能量泵浦光在样品中诱导瞬态峰值电子密度及其空间位置随延时的变化
Fig. 7 Variation of transient peak electron density and its spatial position with delay time

进一步比较了不同数值孔径显微物镜聚焦下, 飞秒激光在样品中诱导等离子体时空演化的区别与联系。图 8 展示了显微物镜的数值孔径为 0.3 时, $16 \mu\text{J}$ 飞秒激光在样品中诱导等离子体的瞬态峰值电子密度及其空间位置随延时的演化。与图 5(b) 相比可以看出在两种数值孔径的显微物镜聚焦下飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度均随延时的增加先增大再逐渐减小。但是, 当显微物镜的数值孔径为 0.45 时, 瞬态峰值电子密度所在的空间位置随延时的增加开始几乎保持在非线性焦点处, 550 fs 后逐渐向样品内部移动, 700 fs 时移动了约 $25 \mu\text{m}$; 当显微物镜的数值孔径为 0.3 时, 瞬态峰值电子密度所在的空间位置随延时的增加逐渐向样品内部移动, 移动范围约为 $70 \mu\text{m}$ 。这可能是数值孔径大的显微物镜聚焦飞秒激光时, 激光能量汇聚和发散比较快, 高光强区域集中在非线性焦点附近, 无法明显观察到等离子体瞬态峰值电子密度空间位置的移动过程; 而数值孔径小的显微物镜聚焦时, 其瑞利长度长, 聚焦的飞秒激光在很长范围内光斑变

化不大,最高瞬态光强的位置随着飞秒激光的传输向样品内部移动,因此可以明显观察到激光的传输过程及瞬态峰值电子密度空间位置的移动。

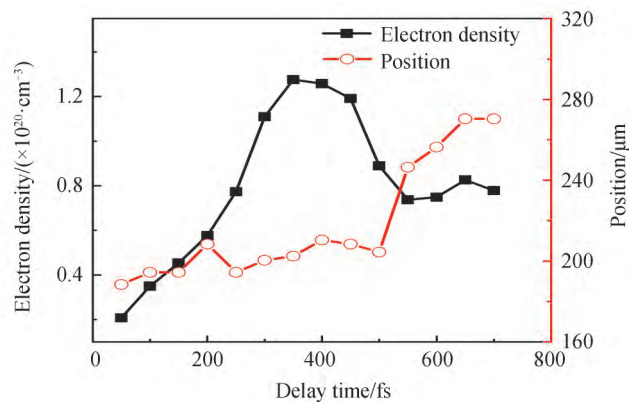


图8 当显微物镜的数值孔径为0.3时,16 μJ 飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度的时空演化

Fig. 8 Temporal-spatial evolutions of the transient peak electron density when 16 μJ femtosecond laser was focused by microscope objective with 0.3 NA

更进一步地,研究了瞬态电子密度的空间分布与激光诱导微结构的联系。图9是显微物镜的数值孔径为0.45和0.3时,16 μJ 飞秒激光在熔融石英的每一个传输深度诱导最大瞬态电子密度的空间分布。图9(a)和9(b)中的灰度图是延时为150 fs的时间分辨阴影图像,插图为16 μJ 飞秒激光在样品中诱导的微结构在50 $\times$ 显微镜下的成像结果。图9(a)和9(b)的共同点是空间上最大瞬态电子密度沿泵浦光传输方向先增大后减小;不同点是图9(a)中样品的微结构是点状结构,而图9(b)中的微结构是长条状结构。以上结果表明,大数值孔径显微物镜聚焦飞秒激光在非线焦点处具有更长的作用时间和更高的作用光强,小数值孔径显微物镜聚焦飞秒激光时,不仅光强降低,光强最高处作用位置也在变化。因此,前者可以诱导出点状的微结构,而后者诱导出微结构在非线焦点后沿激光传输方向延伸并呈长条状分布。值得注意的是,图9(a)和图9(b)中最大瞬态电子密度所在的空间位置与微结构产生的位置基本一致。该结果表明飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像可以成为推断和预测飞秒激光在样品中诱导微结构位置及其分布的有力手段,这对材料的隐身切割、微通道的制备等微结构的制备和调控具有重要的参考意义。

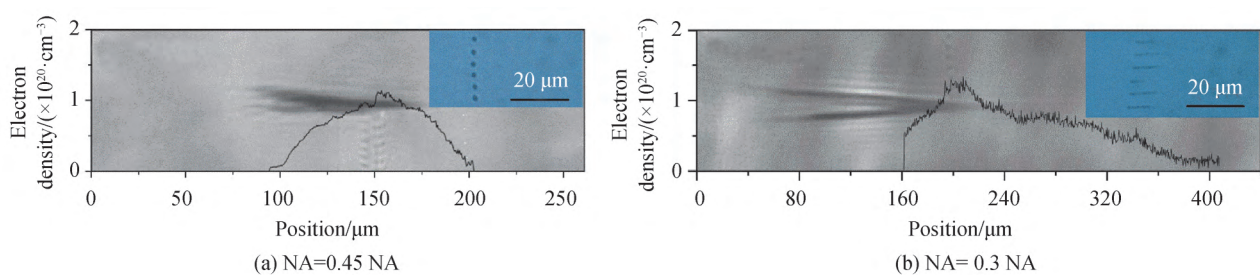


图9 16 μJ 飞秒激光在样品的每一个传输深度诱导最大瞬态电子密度的空间分布。阴影图像的延时为150 fs。插图:16 μJ 飞秒激光诱导微结构在50 $\times$ 显微镜下的成像结果

Fig. 9 Spatial distribution of maximum transient electron density at each propagation depth induced by 16 μJ femtosecond laser. The delay time of the shadow images was 150 fs. Inset: Typical morphologies of microstructure induced by 16 μJ femtosecond laser observed under a 50 $\times$ microscope

3 结论

利用飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像技术研究了显微物镜聚焦的单脉冲飞秒激光在熔融石英中传输时诱导等离子体的瞬态时间-空间演化特性及瞬态电子密度空间分布与激光诱导微结构的联系。结果表明显微物镜聚焦的飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度随延时的增加先增大后逐渐减小。当显微物镜的数值孔径为0.45时,所有延时下飞秒激光在样品内诱导等离子体的分布沿激光传输方向均呈锥状,且等

离子体轴线上瞬态电子密度随激光传输深度的增加先增加后减小。瞬态峰值电子密度的空间位置随延时的增加变化不大,基本都在非线性焦点处,激光诱导的微结构是点状的;当显微物镜的数值孔径为0.3时,飞秒激光在样品中诱导瞬态峰值电子密度的空间位置随延时的增加逐渐向样品内部移动,激光诱导的微结构是长条状的。此外,不同数值孔径显微物镜聚焦飞秒激光在样品中诱导最大瞬态电子密度的空间位置与激光诱导微结构的位置一致,这表明飞秒时间分辨泵浦探测阴影成像可以成为推断和预测飞秒激光在样品中诱导微结构位置及其分布的有效工具。

参考文献

- [1] COUAIRON A, MYSYROWICZ A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. *Physics Reports*, 2007, 441: 47-189.
- [2] GAUDIUSO C, VOLPE A, ANCONA A. One-step femtosecond laser stealth dicing of quartz[J]. *Micromachines*, 2020, 11(3): 327.
- [3] SUN Ke, SUN Shengzhi, QIU Jianrong. Review on research progress of glasses used for optical storage[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111407.
孙轲, 孙盛芝, 邱建荣. 玻璃基类介质光存储研究发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111407.
- [4] QIU Jianrong. Femtosecond laser-induced microstructures in glasses and applications in micro-optics[J]. *The Chemical Record*, 2004, 4: 50-58.
- [5] GUO Baoshan, SUN Jingya, LU Yongfeng, et al. Ultrafast dynamics observation during femtosecond laser-material interaction[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, 1(3): 032004.
- [6] MAO Xianglei, MAO S S, RUSSO R E. Imaging femtosecond laser-induced electronic excitation in glass[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(5): 697-699.
- [7] SUN Quan, JIANG Hongbing, LIU Yi, et al. Measurement of the collision time of dense electronic plasma induced by a femtosecond laser in fused silica[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(3): 320-322.
- [8] PAN Changji, JIANG Lan, WANG Qingsong, et al. Temporal-spatial measurement of electron relaxation time in femtosecond laser induced plasma using two-color pump-probe imaging technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(19): 191101.
- [9] WANG Feifei, PAN Changji, SUN Jingya, et al. Direct observation of structure-assisted filament splitting during ultrafast multiple-pulse laser ablation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10050-10057.
- [10] GAWELDA W, PUERTO D, SIEGEL J, et al. Ultrafast imaging of transient electronic plasmas produced in conditions of femtosecond waveguide writing in dielectrics[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121109.
- [11] HUANG Fengqin, SI Jinhai, CHEN Tao, et al. Temporal-spatial dynamics of electronic plasma in femtosecond laser induced damage[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 14658-14667.
- [12] STUART B C, FEIT MD, HERMAN S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. *Physical Review B*, 1996, 53(4): 1749-1761.
- [13] MAO S S, QUÉRÉ F, GUIZARD S, et al. Dynamics of femtosecond laser interactions with dielectrics[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(7): 1695-1709.
- [14] BULGAKOVA N M, STOIAN R, ROSENFELD A. Laser-induced modification of transparent crystals and glasses[J]. *Quantum Electronics*, 2010, 40(11): 966-985.
- [15] PAPAOGLOU D G, TZORTZAKIS S. Physical mechanisms of fused silica restructuring and densification after femtosecond laser excitation[J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(4): 625-632.
- [16] COUAIRON A, SUDRIE L, FRANCO M, et al. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses[J]. *Physical Review B*, 2005, 71(12): 125435.

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB1104600), Key Research and Development Program of Shaanxi province (No. 2017ZDXM-GY-120), Aeronautical Science Foundation of China (No. 20140870002)