

整形飞秒激光脉冲在熔融石英中的成丝控制研究

常峻巍¹, 许梦宁², 王颀¹, 朱瑞晗^{1*}, 奚婷婷^{2**}, 张兰芝¹, 李东伟¹, 郝作强^{1***}

¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

² 中国科学院大学物理科学学院, 北京 101407

摘要 利用基于液晶空间光调制器的飞秒激光脉冲整形技术,对飞秒激光在熔融石英中形成等离子体丝的过程进行优化控制研究。实验结果表明:通过脉冲整形可以在固体介质中的指定位置产生等离子体丝。实现了整形脉冲在熔融石英中成丝起点的长距离可控移动,最大移动量达到 5.4 mm。通过求解(3+1)维非线性薛定谔方程,对整形脉冲在熔融石英中的成丝过程进行理论模拟研究,得到了与实验一致的结果。研究表明:等离子体丝起始位置是由整形飞秒脉冲的中心峰值强度和包络分布决定的。

关键词 超快光学; 脉冲整形; 等离子体丝; 遗传算法; 成丝起点

中图分类号 O437.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0126021

Control of Filament by Shaped Femtosecond Pulses in Fused Silica

Chang Junwei¹, Xu Mengning², Wang Di¹, Zhu Ruihan^{1*}, Xi Tingting^{2**},
Zhang Lanzhi¹, Li Dongwei¹, Hao Zuoqiang^{1***}

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China

Abstract The pulse shaping technology based on liquid crystal spatial light modulator is used to control the femtosecond laser filament in fused silica. The experimental results show that the filament can be generated at a designated position in fused silica. In addition, a long-distance controllable displacement of the onset of filamentation in fused silica is achieved, with a maximum displacement of 5.4 mm. Furthermore, the theoretical simulation on filamentation of shaped pulse in fused silica is performed based on the (3+1)-D nonlinear Schrödinger equation. The results are consistent with those of experiments. It is demonstrated that the onset of filamentation depends on the peak intensity and envelope of shaped femtosecond pulse.

Key words ultrafast optics; pulse shaping; plasma filament; genetic algorithm; filamentation onset

OCIS codes 320.5540; 320.2250

1 引 言

高功率飞秒激光脉冲在光学介质中传输能够产生等离子体丝,这一非线性现象吸引了国内外众多研究者的兴趣,不仅因为其中蕴涵了丰富的非线性过程,具有重要的基础研究意义,还因为其具有巨大的潜在应用价值^[1-2]。目前,人们已在气体、液体和固体中实现了激光成丝,并基本掌握了成丝的主要物理机制^[3]。在固体介质中产生的等离子体丝能够为微纳通道^[4-5]、成丝波导^[6-8]、光栅和衍射光学元件^[9-13]或其他光电子器件的加工制造提供一种新的思路和方法。为了满足这些应用对等离子体丝的不

同要求,需要对光学介质中的等离子体丝进行精细的控制和优化。目前,人们已经通过很多手段对激光成丝进行了控制和优化研究。例如:通过改变飞秒激光脉冲的啁啾^[14-16]、能量^[15,17]、偏振^[18-19]和脉宽^[20]等参数研究了光学介质中激光等离子体丝的位置、长度和强度等问题;通过使用相位板^[21-24]、光阑^[25]、变形镜^[26-27]、改变聚焦参数和方式^[17,28-29]、利用分子取向^[30]、微透镜阵列^[31]、液晶空间光调制器(LC-SLM)^[32-35]等对飞秒激光光束的空间分布、波前分布或相位分布进行调制,实现对等离子体单丝长度、直径或强度等参数的控制,以及对等离子体多丝数量、空间位置分布及其伴随的超连

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2018-10-21; 录用日期: 2018-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(11474039,11774038)、吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目(20170519018JH)

* E-mail: zhuruihan@126.com; ** E-mail: ttixi@ucas.ac.cn; *** E-mail: zqhao@cust.edu.cn

续辐射等的控制。这些方法都能很好地实现对等离子体丝的控制,特别是 LC-SLM 的引入为控制等离子体丝提供了一种连续可调的、可反馈优化的研究途径。

基于 LC-SLM 的脉冲激光整形技术可以产生任意的激光脉冲波形^[36]。这种激光脉冲整形技术已被广泛采用,在光与物质相互作用的相干控制、相位补偿、脉冲整形与压缩、光信息处理等领域取得了良好的应用效果。由于飞秒激光成丝过程中的自相位调制、色散和多光子电离等效应与脉冲波形直接相关,因此,改变脉冲波形能够有效控制和改变成丝过程。通过 LC-SLM 进行脉冲整形,能够实现激光成丝演化及超连续辐射的控制,并可以通过反馈控制实现结果的最优化。因此,近年来,激光脉冲整形技术也被引入到飞秒激光在介质中形成的等离子体丝及其伴随的超连续辐射的优化控制研究中。2006 年,Heck 等^[37]使用 LC-SLM 实现了激光脉冲在玫瑰红 6G 水溶液中成丝位置及成丝长度的控制。同年,Ackermann 等^[38]使用 LC-SLM 脉冲整形对激光在空气中的成丝和超连续辐射进行了优化和控制。2017 年,Chen 等^[39]使用 LC-SLM 控制整形脉冲实现了空气中成丝长度的延长。但是,这些工作仅仅定性地给出了整形激光脉冲对成丝及其伴随的超连续辐射位置、长度、强度等的控制效果,并没有揭示成丝过程随激光脉冲波形变化的规律,而且,利用脉冲整形技术对固体光学介质中的激光成丝进行优化和控制的研究还未见报道。鉴于此,本

文利用基于 LC-SLM 的脉冲整形技术,进行了熔融石英激光成丝传输的反馈控制研究,实现了对成丝起点位置的长距离可控移动。相应地,利用实验获得的不同迭代代数的整形相位数据和实验参数,通过求解(3+1)维非线性薛定谔方程,对整形激光脉冲在熔融石英中的成丝传输进行了理论模拟研究,得到了与实验结果一致的结论。此外,进一步通过理论模拟得到了不同情况下整形脉冲波形及其随传输距离的演化结果,分析了脉冲波形与等离子体丝起点位置之间的物理联系。

2 实验过程与结论

2.1 实验过程

实验采用重复频率为 1 kHz、中心波长为 800 nm、半峰全宽(FWHM)为 45 fs 的商用掺钽蓝宝石飞秒激光放大器。图 1 为实验装置示意图,其中激光脉冲整形装置由 4f 无色散光路和 LC-SLM 组成。实验中通过计算机将包含整形相位信息的灰度图片加载到 LC-SLM 上,进而实现对激光脉冲的相位调制,获得相应的整形飞秒激光脉冲。得到的整形飞秒激光脉冲通过一个焦距为 200 mm 的平凸透镜聚焦到尺寸为 30 mm×30 mm×100 mm 的熔融石英块中,并在其中形成等离子体丝。在实验中,平凸透镜与熔融石英前表面的距离为 175 mm,入射激光的能量为 5.7 μJ。熔融石英中的等离子体丝通过一个焦距为 100 mm 的平凸透镜成像到科学级电荷耦合器件(CCD)相机上进行采集记录。

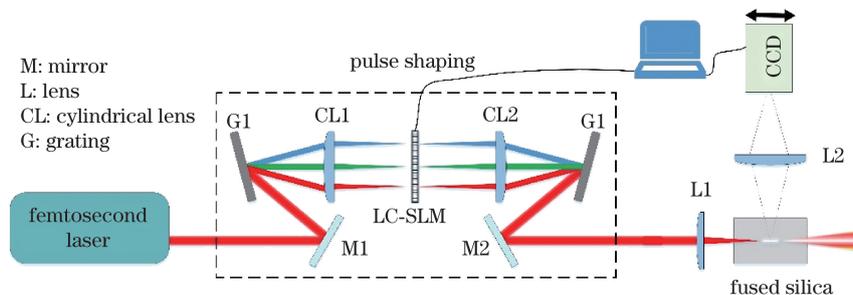


图 1 整形脉冲成丝控制实验装置示意图

Fig. 1 Experimental diagram of filamentation control of shaped pulses

图 2 为整形脉冲成丝的反馈控制流程图,使用 LabVIEW 和 C 语言编写基于遗传算法的反馈控制程序,以实现对整形脉冲成丝的反馈控制。首先,使用程序随机生成一组 50 个补偿相位作为遗传算法的第 1 代(即初始的父代)。然后,将 50 个补偿相位依次加载到 LC-SLM 上获得对应的激光整形脉冲,并依次聚焦到熔融石英中形成等离子体丝,使用

CCD 采集相应的等离子体丝荧光图像。接着,使用算法分析成丝的荧光图像,提取成丝起点位置数据,对这些数据进行分析 and 排序,筛选出其中符合设定要求的数据及其对应的补偿相位。最后,使用遗传算法对这些相位进行交叉和变异,生成下一代 50 个补偿相位。重复上述的实验过程,循环迭代直到得到的起点位置数据满足程序设置的评价函数,迭代

结束。此外,对于加载的每一个相位,实验上均采集了 20 组成丝图像,分析得到成丝起点位置的数据,并将其平均值作为该相位情况下的成丝起点位置。

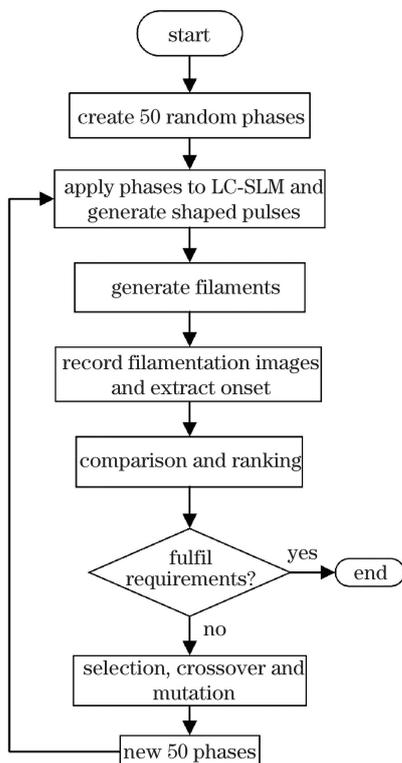


图 2 整形脉冲成丝反馈控制流程图
Fig. 2 Feedback control flowchart of filamentation of shaped pulses

2.2 实验结果

图 3 给出了整形脉冲成丝起点位置控制实验中几个典型迭代代数对应的等离子体丝的荧光图像,编号 1、2、11、21、22、36、51、70 分别表示对应的迭代代数,箭头表示激光的传输方向,横坐标为成丝起点到熔融石英前表面的距离。从等离子体丝荧光图中可以看出,等离子体丝的起始位置随着迭代代数的增加而逐渐向熔融石英前表面移动。对比第 51 代和第 70 代迭代下的成丝情况可以看出,等离子体丝的起始位置基本一致,即当迭代达到一定代数后,等离子体丝的起点位置不再发生明显变化。

通过提取荧光图像中等离子体丝的起点位置数据,可以得到等离子体丝起点位置随遗传算法迭代代数的变化曲线,如图 4 所示,其中,纵坐标表示等离子体丝起点位置到熔融石英前表面的距离。从图 4 中可以看出:第 1 代随机补偿相位得到的整形飞秒激光脉冲在大约 31.1 mm 位置处开始产生等离子体丝;随着迭代代数增加,等离子体丝的起点位置快速向熔融石英前表面移动,在前 10 代的迭代

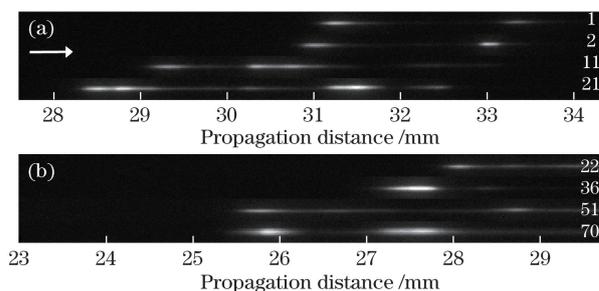


图 3 迭代代数分别为 1、2、11、21、22、36、51、70 时的激光等离子体丝荧光图像

Fig. 3 Luminescence images of laser plasma filament for different generations of 1, 2, 11, 21, 22, 36, 51, 70, respectively

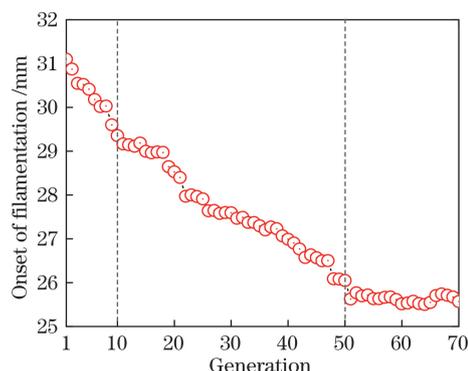


图 4 等离子体丝起点位置随遗传算法迭代代数的变化曲线

Fig. 4 Onset of filamentation as a function of genetic algorithm generation

中,起点位置移动量的变化很大;随着迭代代数进一步增加,从第 11 代迭代开始到第 50 代迭代过程中,起点位置的移动量逐渐趋于平缓;从第 51 代迭代开始,等离子体丝的起点位置基本不变,维持在 25.7 mm 左右。也就是说,通过脉冲整形的反馈控制,实现了熔融石英中等离子体丝起点位置的可控连续移动,最大移动量达到了 5.4 mm。

基于不同迭代代数对应整形脉冲的相位数据,可以得到相应的整形脉冲波形。图 5 给出了几个典型的脉冲包络,可以看出:第 1 代迭代随机产生的补偿相位对应的脉冲时域包络范围达到了 ± 3 ps,波形比较复杂,最大的峰值强度仅为 $0.1 \text{ TW} \cdot \text{cm}^{-2}$,位于脉冲包络的后沿,同时在包络的前后沿分布了很多低强度的子脉冲;当迭代进行到第 11 代时,可以看到整形脉冲时域包络的复杂性出现了明显变化,脉冲前后沿的子脉冲数量减少且强度明显降低,包络时间宽度减小,最大峰值的强度相对于第 1 代增大了近 1 倍,并且移动到了靠近包络中心的前沿位置。为了进一步验证脉冲时域包络随迭代代数增

加的变化规律,图 5 还给出了第 21、第 36、第 51、第 70 代迭代的整形脉冲的时域包络。可以看出:随着迭代代数的进一步增加,脉冲时域包络的宽度变得更小;第 70 代迭代得到的脉冲时域包络的中心峰值强度达到了 $0.5 \text{ TW} \cdot \text{cm}^{-2}$,相对于第 1 代约增加了 4 倍,偏离中心的子脉冲基本消失或强度变得很低。

对比第 51 代和第 70 代迭代的脉冲时域包络形状可以发现,这两代迭代得到的脉冲时域包络形状几乎没有发生变化。因此,可以认为:从第 51 代迭代开始,脉冲波形不再发生明显的变化,这与实验中第 51 代后等离子体丝的起点位置不再出现明显移动这一结论相对应。

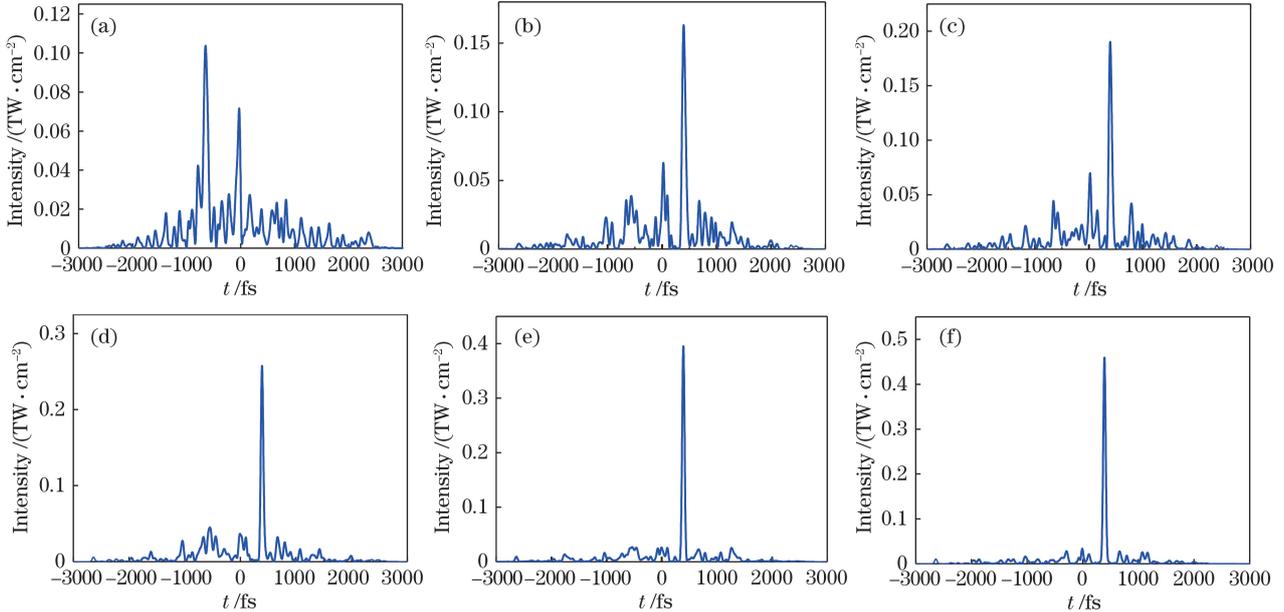


图 5 不同迭代代数对应的整形脉冲的初始时域波形。(a) 1; (b) 11; (c) 21; (d) 36; (e) 51; (f) 70

Fig. 5 Initial time domain waveform of shaped laser pulse for different generations.

(a) 1; (b) 11; (c) 21; (d) 36; (e) 51; (f) 70

上述结果可以利用移动焦点模型进行解释。在移动焦点模型中,准直高斯光束在均匀克尔介质中形成的等离子体丝的起点位置可以由自聚焦点距离 Z_f 给出,即 Marburger 公式^[40]:

$$Z_f = \frac{0.367k_0 a_0^2}{\sqrt{(\sqrt{P/P_{cr}} - 0.852)^2 - 0.0219}}, \quad (1)$$

式中: k_0 为波数; $a_0 = 0.5 \text{ mm}$ 为光束在熔融石英前表面处的半径; P 为初始脉冲峰值功率; P_{cr} 为激光在熔融石英中的自聚焦临界阈值,取 2.7 MW 。实验采用外部聚焦,所以等离子体丝的实际起始位置 Z 由 Z_f 和熔融石英前表面到几何焦点的距离 f 决定^[40]:

$$Z = \frac{Z_f \times f}{Z_f + f}. \quad (2)$$

通过(2)式计算得到的 Z 为等离子体丝的起点位置到熔融石英前表面的距离。通过计算可以得到整形脉冲的时间波形分布(如图 5 所示),进一步可以得到脉冲峰值处的功率。将该功率代入到(1)式和(2)式中,就可以得到不同迭代代数下的等离子体丝起点位置,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,根据整形脉冲的峰值计算得到的等离子体丝的起点位置

随迭代代数的变化与实验得到的变化趋势一致,等离子体丝的起点位置都经过了快速移动,逐渐变缓,最后趋于稳定的一个过程。需要说明的是,(1)式是适用于理想的高斯型激光光束的半经验公式,对于本实验的条件,无法给出定量的结果,但利用该公式仍然可以得到定性的演化规律,且该规律与实验结果相符,从而揭示了成丝的起点是由整形脉冲的峰值脉冲决定的。

以上说明,本研究实现了整形飞秒激光脉冲在熔融石英中对等离子体丝起点位置的移动控制。将脉冲整形技术与遗传算法的反馈控制系统相结合,可以实现成丝起点位置的长距离任意移动。通过对理论计算与实验得到的等离子体丝起点位置随迭代代数的变化,并结合不同迭代代数对应整形脉冲时域波形的分析可以看出,等离子体丝的初始形成位置主要受时域脉冲中心峰值强度的影响,激光脉冲峰值强度越大,越容易达到自聚焦条件,从而影响等离子体丝的产生。

与已有的激光成丝控制方法相比,激光脉冲整形技术具有成丝稳定性好以及可以实现大范围连续

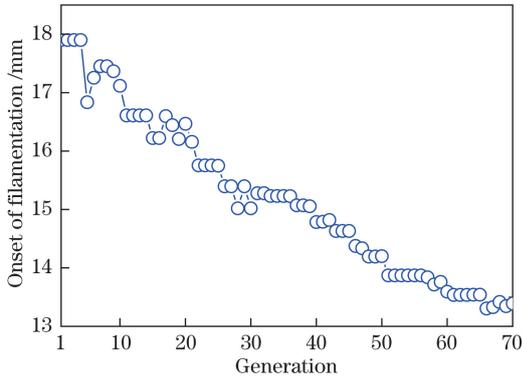


图 6 等离子体丝起点位置随遗传算法迭代代数的理论变化曲线

Fig. 6 Onset of filamentation as a function of genetic algorithm generation

可调等优点,这对于提高等离子体丝在成丝加工等应用中的效率和稳定性具有重要的参考价值。

3 数值模拟结果与分析

为了深入理解整形激光脉冲的时域波形与等离子体丝起始位置的关系及物理机制,利用实验获得的不同迭代代数的整形相位数据和实验参数,通过求解(3+1)维非线性薛定谔方程,对整形飞秒激光脉冲成丝过程进行数值模拟研究。飞秒激光脉冲在熔融石英中的传输可由耦合的非线性薛定谔方程和电子密度方程来描述^[41]:

$$\partial_z E = \frac{i}{2k_0} T^{-1} \nabla_{\perp} E + iDE + i \frac{\omega_0}{c} n_2 T |E(t)|^2 E - i \frac{k_0}{2n_0 \rho_c} T^{-1} \rho E - \frac{\beta^{(\kappa)}}{2} |E|^{2\kappa-2} E - \frac{\sigma}{2} \rho E, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\beta^{(\kappa)} |E|^{2\kappa}}{U_i} + \frac{\sigma \rho |E|^2}{U_i} - \frac{\rho}{\tau_{rec}}, \quad (4)$$

式中: ρ_c 为等离子体的临界密度, $\rho_c = 1.73 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$; τ_{rec} 为电子复合时间, $\tau_{rec} = 150 \text{ fs}$; E 为激光电场包络; z 为传输距离; k_0 为激光的中心波数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$; σ 为逆布里渊散射截面, $\sigma = 2.78 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$; U_i 为电离势, $U_i = 7.6 \text{ eV}$; κ 为多光子电离一次吸收的光子数, $\kappa = 5$; $\beta^{(\kappa)}$ 为多光子电离系数, $\beta^{(\kappa)} = 3.4 \times 10^{-51} \text{ cm}^7 \cdot \text{W}^{-4}$; ρ 为等离子体的密度; ω_0 为激光的中心频率; n_2 为熔融石英中的克尔非线性系数, $n_2 = 3.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$; c 为光速; λ_0 为激光中心波长, $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$; ∇_{\perp} 为拉普拉斯算符, $\nabla_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 描述了光束的衍射过程,该算符前的 $T = 1 + (i/\omega_0)\partial_t$ 描述了时空聚焦效应;激光脉冲在熔融石英中的色散过程由算符 $D = \sum_{n \geq 2} (k^{(n)}/n!) (i\partial_t)^n$ 描述,另 $k^{(n)} = \partial^n k / \partial \omega^n |_{\omega_0}$, $k = n(\omega)\omega/c$,

文献[42]给出了 $n(\omega)$ 的表达式;克尔效应前的算符 T 描述了脉冲的自陡峭效应。(3)式中的其余各项分别为电子散焦效应、多光子吸收耗散和碰撞电离耗散。

在模拟中,初始光场包络可以表示为

$$E(x, y, t, z = 0) = \sqrt{2P/(\pi\omega_0^2)} \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right) A(t) \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2}{2f}\right), \quad (5)$$

式中: ω_0 为半径; $A(t)$ 为典型迭代代数对应的整形脉冲在时间上的波形分布(如图5所示),使用了焦距 $f = 2.5 \text{ mm}$ 的透镜聚焦。激光初始能量设定为 $2 \mu\text{J}$;初始光斑在横截面上为高斯分布,半径 $\omega_0 = 42 \mu\text{m}$ 。初始脉冲峰值功率 P 由初始能量和脉冲波形 $A(t)$ 计算得到。数值模拟得到了等离子体丝强度沿传输距离的演化,如图7所示,图中曲线编号分别对应图5中的迭代代数。从图7可以看出:等离子体丝起点位置随迭代代数的变化趋势与实验结果一致,即随着迭代代数增加,等离子体丝起始位置逐渐向入射方向移动;从第1代到第11代的移动量很大;其后的第11代至第51代的移动量逐渐变缓;并且,第51代和第70代迭代的等离子体丝强度演化几乎相同,这与实验中经过51代迭代后等离子体丝的起始位置基本不变的结论一致。为了减少数值模拟的运算时间,将所用的初始参数(光斑半径和焦距)相对于实验参数进行等比例缩小,并且只考虑激光在熔融石英中的传输过程,同时将聚焦透镜到熔融石英前表面之间的空气中传输过程作为线性过程考虑。因此,数值模拟得到的成丝起点位置与实验结果不一致,但是模拟得到的成丝起点位置的演化趋势与实验结果符合,从而可以从理论上揭示成丝起点位置变化的物理机制。

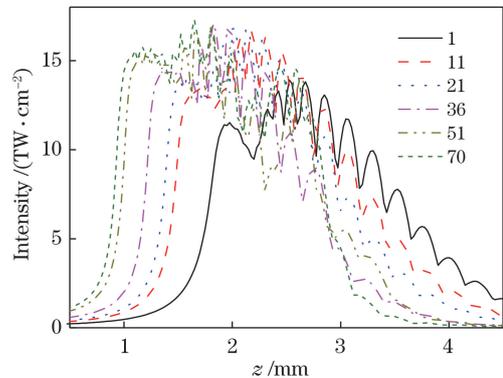


图 7 不同迭代代数下等离子体丝强度随传输距离的变化

Fig. 7 Intensity of plasma filamentation vs. propagation distance for different generations

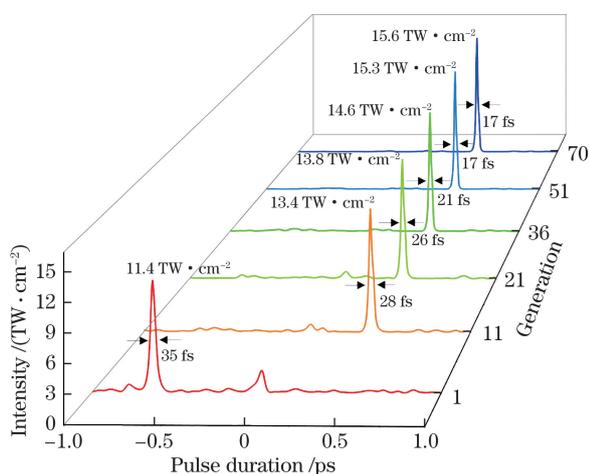


图 8 不同传输距离处整形脉冲时域波形

Fig. 8 Time domain waveform of shaped pulses at different transmission distances

通过以上实验和数值模拟结果及其对比可以看出,整形脉冲时域包络的中心峰值强度和包络的复杂性决定了等离子体丝在介质中的初始形成位置。图 8 进一步给出了几个典型迭代代数时的脉冲波形,位置选取激光强度达到第一个峰值即达到强度钳制时所对应的位置,这些位置可以从图 7 中得到,第 1、第 11、第 21、第 36、第 51、第 70 代迭代时等离子体丝强度达到第一个峰值时的传输距离分别为 1.925, 1.625, 1.525, 1.35, 1.15, 1.1 mm。从图 8 可以看出:除了第 1 代,其余的各代等离子体丝到达峰值时的脉冲波形的中心峰位变化不明显,但波峰宽度随着迭代代数增加而明显减小,峰值强度也不断增加。此外,中心波峰以外的一些子脉冲也随着迭代代数的增加而逐渐减弱,直至消失。

4 结 论

通过基于遗传算法的反馈控制程序进行了整形飞秒激光脉冲在熔融石英中产生等离子体丝起点位置的连续控制研究,等离子体丝起点位置的可控移动量达到了 5.4 mm。通过移动焦点模型的 Marburger 公式计算了不同迭代代数对应的整形脉冲在熔融石英中形成的等离子体丝的起点位置,得到了与实验结果一致的变化趋势。此外,通过求解非线性薛定谔方程,模拟了不同迭代代数对应的整形脉冲在熔融石英中成丝和脉冲波形随传输距离的演化,揭示了影响等离子体丝起始位置的决定性因素是脉冲峰值的强度及其复杂分布:包络越复杂、中心峰值越小的激光,成丝起点位置距熔融石英前表面越远;脉冲波形较为简单、中心峰值越强的激光脉

冲,成丝起点位置越靠近熔融石英前表面。利用脉冲整形技术实现了等离子体丝起点位置的控制,可控移动范围大,可以连续调节,为整形脉冲激光等离子体丝在微纳加工、光电微纳器件等领域的应用提供了更多的理论和技术手段。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. *Physics Reports*, 2007, 441(2/3/4): 47-189.
- [3] Béjot P, Kasparian J, Henin S, *et al.* Higher-order Kerr terms allow ionization-free filamentation in gases[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 103903.
- [4] Li C, Shi X, Si J, *et al.* Photoinduced multiple microchannels inside silicon produced by a femtosecond laser[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(2/3): 377-381.
- [5] Herbstman J F, Hunt A J. High-aspect ratio nanochannel formation by single femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16840-16848.
- [6] Salimnia A, Vallée R, Chin S L. Waveguide writing in silica glass with femtosecond pulses from an optical parametric amplifier at 1.5 μm [J]. *Optics Communications*, 2005, 256(4/5/6): 422-427.
- [7] Blonskyi I, Kadan V, Shpotyuk O, *et al.* Filament-induced self-written waveguides in glassy $\text{As}_4\text{Ge}_{30}\text{S}_{66}$ [J]. *Applied Physics B*, 2011, 104(4): 951-956.
- [8] Zhang S G, You W C, Ma X R, *et al.* Spectral broadening in femtosecond pulse written filamentary waveguides in periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16222-16231.
- [9] Yamada K, Watanabe W, Li Y D, *et al.* Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1846-1848.
- [10] Lee S, Nikumb S. Characteristics of filament induced Damman gratings fabricated using femtosecond laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(7): 1328-1333.
- [11] Ran L L, Qu S L. Self-assembled volume vortex grating induced by femtosecond laser pulses in glass[J]. *Current Applied Physics*, 2009, 9(6): 1210-1212.
- [12] Watanabe W, Mochizuki H. Femtosecond laser direct writing of diffractive optical elements in polymers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7585: 75850B.
- [13] Ertorer E, Haque M, Li J Z, *et al.* Femtosecond

- laser filaments for rapid and flexible writing of fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 9323-9331.
- [14] Xi T T, Zhao Z J, Hao Z Q. Filamentation of femtosecond laser pulses with spatial chirp in air[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(2): 321-324.
- [15] Milián C, Jarnac A, Brelet Y, *et al.* Effect of input pulse chirp on nonlinear energy deposition and plasma excitation in water[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(11): 2829-2837.
- [16] Liang H, Sun H Y, Liu Y H, *et al.* Chirp control of femtosecond laser-filamentation-induced snow formation in a cloud chamber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(3): 033201.
- [17] Wu Z X, Jiang H B, Sun Q, *et al.* Filamentation and temporal reshaping of a femtosecond pulse in fused silica[J]. *Physical Review A*, 2003, 68(6): 063820.
- [18] Blonskyi I, Kadan V, Shynkarenko Y, *et al.* Periodic femtosecond filamentation in birefringent media[J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(4): 705-710.
- [19] Shi Y, Chen A M, Jiang Y F, *et al.* Influence of laser polarization on plasma fluorescence emission during the femtosecond filamentation in air[J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 174-180.
- [20] Sun Q, Asahi H, Nishijima Y, *et al.* Pulse duration dependent nonlinear propagation of a focused femtosecond laser pulse in fused silica[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24495-24503.
- [21] Fu Y X, Xiong H, Xu H, *et al.* Generation of extended filaments of femtosecond pulses in air by use of a single-step phase plate[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3752-3754.
- [22] Liu L, Wang C, Cheng Y, *et al.* Fine control of multiple femtosecond filamentation using a combination of phase plates[J]. *Journal of Physics B*, 2011, 44(21): 215404.
- [23] Gao H, Chu W, Yu G L, *et al.* Femtosecond laser filament array generated with step phase plate in air[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4612-4622.
- [24] Clerici M, Hu Y, Lassonde P, *et al.* Laser-assisted guiding of electric discharges around objects[J]. *Science Advances*, 2015, 1(5): e1400111.
- [25] Hao Z Q, Stelmaszczyk K, Rohwetter P, *et al.* Femtosecond laser filament-fringes in fused silica[J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7799-7806.
- [26] Ionin A A, Iroshnikov N G, Kosareva O G, *et al.* Filamentation of femtosecond laser pulses governed by variable wavefront distortions via a deformable mirror[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(8): 2257-2262.
- [27] Englesbe A C, He Z H, Nees J A, *et al.* Control of the configuration of multiple femtosecond filaments in air by adaptive wavefront manipulation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6071-6082.
- [28] Th  berge F, Liu W W, Simard P T, *et al.* Plasma density inside a femtosecond laser filament in air: strong dependence on external focusing[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(3): 036406.
- [29] Hao Z Q, Salam   R, Lascoux N, *et al.* Multiple filamentation of non-uniformly focused ultrashort laser pulses[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94(2): 243-247.
- [30] Lu P F, Wu J, Zeng H P. Manipulation of plasma grating by impulsive molecular alignment[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(22): 221113.
- [31] Camino A, Hao Z Q, Liu X, *et al.* Control of laser filamentation in fused silica by a periodic microlens array[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7908-7915.
- [32] Vizcaino J P, Mendoza-Yero O, Borrego-Varillas R, *et al.* On-axis non-linear effects with programmable Dammann lenses under femtosecond illumination[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1621-1623.
- [33] Borrego-Varillas R, Perez-Vizcaino J, Mendoza-Yero O, *et al.* Controlled multibeam supercontinuum generation with a spatial light modulator[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 26(16): 1661-1664.
- [34] Li P P, Cai M Q, L   J Q, *et al.* Control of femtosecond multi-filamentation in glass by designable patterned optical fields[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(12): 125103.
- [35] Mendoza-Yero O, Carbonell-Leal M, Donate-Buendia C, *et al.* Diffractive control of 3D multifilamentation in fused silica with micrometric resolution[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15307-15318.
- [36] Weiner A M. Ultrafast optical pulse shaping: a tutorial review[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(15): 3669-3692.
- [37] Heck G, Sloss J, Levis R J. Adaptive control of the spatial position of white light filaments in an aqueous solution[J]. *Optics Communications*, 2006, 259(1): 216-222.
- [38] Ackermann R, Salmon E, Lascoux N, *et al.* Optimal control of filamentation in air[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(17): 171117.
- [39] Chen A M, Li S Y, Qi H X, *et al.* Elongation of plasma channel generated by temporally shaped femtosecond laser pulse[J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 144-147.
- [40] Liu W, Chin S L. Direct measurement of the critical power of femtosecond Ti:sapphire laser pulse in air[J]. *Optics Express*, 2005, 13(15): 5750-5755.
- [41] Tzortzakis S, Sudrie L, Franco M, *et al.* Self-guided propagation of ultrashort IR laser pulses in fused silica[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(21): 213902.
- [42] Rolle J, Berg   L, Duchateau G, *et al.* Filamentation of ultrashort laser pulses in silica glass and KDP crystals: a comparative study[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(2): 023834.