

飞秒激光脉冲在空气中成丝调控研究进展*

聂劲松, 胡瑜泽

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:在衍射、色散、克尔效应和多光子电离的动态平衡作用下,飞秒激光脉冲能够形成长距离的自引导光丝结构,并且伴随着狭长的等离子体通道。为精确控制超强飞秒激光脉冲在大气中的传输特性,针对飞秒光丝传输模式及光丝光场时空分布的有效调控已成为当前研究热点。在介绍飞秒激光成丝物理模型的基础上,对飞秒激光成丝调控方面的最新进展进行了综述,将光丝调控方式大致归结为两部分:时间调控和空间调控。其中,在空间维度上的调控主要可以分为相位调控、振幅调控以及特殊光场调控。同时指出飞秒激光大气成丝调制能产生众多的新效应,可为促进飞秒光丝实现更多新颖的潜在应用奠定基础。

关键词:飞秒激光成丝;光场调控;克尔效应;自聚焦;等离子体散焦;多光子电离;光强钳制效应

中图分类号: O437.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)04-001-08

Research progress in controlling femtosecond laser filamentation in atmosphere

NIE Jinsong, HU Yuze

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Under the dynamic equilibrium among diffraction, dispersion, Kerr effect and multiple photons ionization, a self-guiding filament formed by femtosecond laser with long propagation distance can be constructed, which is accompanied by a narrow plasma channel. In order to control the propagation features of filamentation explicitly in air, a way to effectively regulate filamentation propagation modes and spatio-temporal distributions has become a research hotspot. On the basis of introducing the physical model of filamentation briefly, a general overview of controlling filamentation divided by two parts was presented in this review: temporal modulations and spatial modulations. In particular, the latter consists of modulations designed by phase, amplitude and special beams. Our findings suggest that unique filaments controlled by initial modulations can offer advantages and fundamentals for the realization of numerous potential applications.

Key words: femtosecond laser filamentation; light field modulation; Kerr effect; self-focusing; plasma defocusing; multi-photons ionization; intensity clamping

随着锁模技术和啁啾脉冲放大技术的发展,脉宽极短、峰值功率极高的飞秒激光器应用日益广泛。目前商品化的飞秒激光器可以输出脉宽短于10 fs的激光,功率可达太瓦(10¹² W)级甚至帕瓦(10¹⁵ W)级^[1]。高功率飞秒激光与介质相互作用会呈现众多的非线性效应,例如克尔效应、等离子体自散焦、受激拉曼(散射)效应、谐波产生、场致电离等。同时,与皮秒和纳秒激光不同,在大气中传输时,高能飞秒激光脉冲没有足够长的时间激发雪崩电离,能很好地避免大气光学击穿。

飞秒激光大气成丝于1995年,首先被密歇根大学的Braun等发现^[2],当一束吉瓦量级的近红外飞秒激光脉冲被入射到大气中,这束光自行地

约束成一根具有长寿命的、自导的光通道,并且持续了几十米的距离。这种在激光自聚焦和等离子体自散焦的动态平衡下形成的具有高峰值光强、稳定的自引导传输的狭长光通道被称为光丝。

光丝在众多方面具有重要的潜在应用价值。例如:其高强度钳制光强可用于超快光学加工^[3-4]、人工降雨^[5-7]、激光武器、激光诱导核反应;其等离子体通道可以用于激光引雷^[8-9]、虚拟天线、光学波导、太赫兹辐射源的产生;其超连续白光辐射可以用于激光雷达、远距离探测、激光遥感^[10-11]等。这一系列广泛的潜在应用都基于一个共同的前提——产生可控且稳定的飞秒光丝。因此,近二十多年来,对飞秒光丝的研究可谓是蓬勃发展,并且研究的深度、力度、广度呈现明显增

* 收稿日期:2018-01-15

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金资助项目(2015J1003)

作者简介:聂劲松(1970—),男,安徽巢湖人,研究员,博士,博士生导师, E-mail: njs7001@sina.com

强的势头。

有效操控飞秒激光光丝的方法总体上可以分为两大类——时间领域操控和空间领域操控。

1 飞秒激光大气成丝基本模型

中心波长位于 800 nm 附近的掺钛蓝宝石激光是目前实验研究中应用最广泛的飞秒激光装置。高功率的飞秒激光在大气中传输时,在克尔效应的影响下,初始高斯光场会不断朝着中心区域进行自聚焦。当光强达到一定值时,空气中的氧分子和氮气分子会由于多光子电离而产生一定浓度的等离子并对光束起着自散焦的作用。飞秒光丝则在自散焦和自聚焦的动态平衡中维持长距离的稳定传输,光强通常钳制在几十太瓦每平方米,尺寸一般为 40 ~ 200 μm 。图 1 为光丝自导引传输模型示意图。为了解释该现象,1997 年 Brodeur 等提出了移动焦点模型^[12],将飞秒激光脉冲分为多个切片并对应相应的功率值。当超过自聚焦阈值功率时,每个切片自聚焦的焦点位置可用 Marburger 公式^[13]描述。

$$z_f = \frac{0.367ka^2}{\{[(P/P_{cr})^{0.5} - 0.852]^2 - 0.0219\}^{0.5}} \quad (1)$$

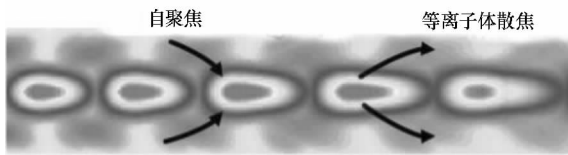


图 1 光丝自导引传输模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-guiding channel of filaments

对于脉宽为几十飞秒的激光脉冲,电离过程中通常可以忽略逆韧致辐射和碰撞电离,这也正是空气中电离的等离子浓度不会过高而对激光产生屏蔽作用的原因。飞秒激光大气成丝过程中,通常考虑到的物理效应有:衍射、群速度色散、自陡峭效应、多光子电离、克尔效应、等离子体自散焦等。通过对传输的脉冲采取慢包络振幅近似和傍轴近似的方法,可以很好地将麦克斯韦方程简化为经典的非线性薛定谔方程进行求解。

$$\frac{\partial A}{\partial z} = i \frac{1}{2k_0} \Delta_{\perp}^2 A - i \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i \frac{k_0 n_2}{2} |A|^2 A - ik_0 \frac{\rho_e}{2\rho_c} A - \frac{\beta^{(K)}}{2} |A|^{2K-2} A \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} = \frac{\beta^{(K)}}{K\hbar\omega_0} |A|^{2K} \left(1 - \frac{\rho_e}{\rho_{at}}\right) \quad (3)$$

其中, $A(x, y, z, t)$ 为飞秒激光的光场包络随着距

离 z 的演化, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ($\lambda_0 = 800 \text{ nm}$) 为中心波长所对应的波矢, $\Delta_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 为表示其衍射效应的拉普拉斯算符,对时间的二阶倒数代表在 $k'' = \partial k/\partial \omega$ 的色散系数下的色散效应, n_2 为二阶非线性折射率, ρ_{at} 和 ρ_c 分别代表空气中的大气分子密度和电离阈值等离子体密度, ρ_e 为电离空气中的等离子体密度, $\beta^{(K)}$ 为多光子吸收系数,多光子的数量为 K 。方程(3)为大气中产生等离子体的多光子电离方程。求解该方程组一般可采用分步傅里叶法和龙格库塔法相结合的方式。

2 时间维度调控飞秒激光大气成丝

在时间维度上,目前所能采用的方法相对较少。1996 年,即发现飞秒光丝的第二年, Bergé 等就发现了采用时间啁啾调制的方式可以明显地增强钳制光强,并且会影响时间维度上的光丝分裂过程^[14]。接下来,在 2005 年, Nuter 等进一步研究了啁啾调制对光丝的影响,发现使用不同程度的负啁啾调制,可以改变成丝位置、光丝长度,并可进一步缩短光丝中少周期脉冲的脉宽^[15]。2010 年, Varela 等更是通过啁啾调制系统地控制超连续谱的产生^[16]。另一种方法是利用多脉冲的方式来操控光丝。主要包括:2003 年, Couairon 等采用间隔 100 fs 的偏振状态相互垂直的双脉冲,发现其相互影响下的多光子电离可以增加等离子通道的长度^[17]。2004 年, Bergé 所在团队发现通过合适的脉冲间隔,在光丝形成过程中两个脉冲会融合,并且得到了长一倍的等离子体通道^[18]。2009 年, Zhou 等证明了纳秒激光能激活光丝中的等离子通道^[19]。2014 年, Papeer 等使用纳秒激光伴随飞秒激光传输,从而使光丝得到延长^[20]。

3 空间维度调控飞秒激光大气成丝

在空间维度上,其光丝操控手段和方法要比时间维度上的丰富得多。1997 年, Bergé 发现通过外加磁场的方式,可以增强飞秒激光的自聚焦效应^[21]。1998 年, Schjødt-Eriksen 等利用两个飞秒激光脉冲并行传输,发现光丝之间可以相互吸引并出现旋转现象,这种现象将有利于光丝的延长^[22]。同年, Bergé 通过控制多束光飞秒激光的间距和功率,观察到多丝的融合、离散和聚结现象^[23]。接下来,为了更好地理解延长光丝的机制, Mlejnek 所在团队分别在 1999 年和 2000 年提出了动态能量补偿的概念^[24-25],即光丝周围环绕着一个背景能量库,虽然光强不强却占据着脉冲

的大部分能量,正因为这部分能量与光丝的相互作用,才使得光丝具有长寿命。该概念于2005年被Liu团队用实验得到验证,他们用小孔遮去光丝外环的能量后,发现光丝立即终止^[26]。随后,他们又进行了相关的仿真研究,结果表明,至少需要50%的背景能量才能维持光丝的自导引传输^[27]。另外,Chin团队在2002年也从实验和仿真上研究了多丝和其环形能量结构的相互干涉作用,只是没有从能量库的角度去解释该现象^[28]。

在2007年,中国科学院物理研究所Hao等巧妙地利用能量库,通过不同大小的轴上小孔控制光丝的数量、模式、传输距离和空间稳定性^[29]。同样的工作也在2009年被Daigle团队用来增强等离子体浓度和加长光丝传输距离^[30]。在2000年,Fibich等发现采用椭圆截面分布的入射激光将会降低飞秒光束成丝的阈值功率^[31],由此引起了其他团队后续对椭圆飞秒激光成丝的研究。例如,Dubietis等在2004年首次在实验上观测到椭圆形飞秒激光光束能产生周期性稳定的多丝结构^[32];同年,Fibich等更是采用改变聚焦透镜与光轴的夹角来形成不同椭圆形状的飞秒激光光束,从而达到控制多丝的目的^[33];仍与此同时,Kandidov团队从数值仿真上探究了椭圆长轴和短轴之比,即椭圆率对多丝结构及其融合的影响规律,并得到了相应的经验公式^[34];2006年,Fedorov等发现在高功率的情况下,采取特殊形状的椭圆光束能更好形成规则分布的多丝^[35];2007年,Dubietis等更是探索了高椭圆率初始光束对成丝的影响^[36],类似的情况在2009年被Majus团队再次研究并得到相似的结论^[37]。从功率的角度考虑,Tzortzakis等于2001年从数值和实验上发现脉冲功率超过25倍自聚焦阈值功率后,单根光丝会在空间上分裂成双光丝,并得出此现象的成因主要是光克尔效应的结论^[38]。另外,2005年中国科学院物理研究所光学物理实验室Jin等进一步研究发现,成丝位置和光丝长度能够通过调节激光能量和发散角来连续改变^[39]。通过对初始飞秒光束的相位调制来达到操控飞秒光丝的目的,不失为一种非常有效的方法。2003年,Golubtsov等通过数值模拟的方法,利用初始相位的变化,能移动成丝距离,并且很明显地延长了光丝长度、增强了超连续谱辐射^[40]。2004年,Méchain团队进行了类似的工作,发现在初始脉冲上增加特定的相位畸变后,可以用来控制和重组多丝结构,进而延长光丝和增强超连续谱辐射^[41]。

光丝之间的相互作用能产生融合、分裂、相互吸引等新奇现象,这也吸引不少研究团队的视线。例如,在2004年,Hosseini团队在实验上观察到多丝之间的竞争会产生不规则的样式变化,数值仿真证明了光丝动态的相互作用将在很大程度上取决于初始的光束扰动^[42]。2006年,中国科学院物理研究所Hao等在实验上观察到了多丝的演化过程,发现多丝在经过融合、分裂之后,最后会被吸引到主光丝上^[43],这是对多丝竞争现象的更进一步解释。2004年,Kandidov等发现在飞秒光束横截面上增加特定扰动,可以形成空间上有规则的光丝分布^[44]。2005年,Akozbeq团队对初始光束的横截面增加矩形网格,从而进行周期性的强度调制,得到了规则分布的多丝^[45]。到2014年,Panagiotopoulos等数值模拟了中心轴对称网格框架对多丝的影响^[46]。各种透镜的组合对于多丝的控制也逐渐开始吸引研究人员的眼球。2011年,Fu等使飞秒激光通过相互正交的像散柱面镜,控制柱面透镜距离,从而达到了控制旁瓣光丝的目的^[47]。2013年,Sun X等利用轴锥镜阵列产生多丝^[48]。2014年,Camino等又使用微透镜阵列产生多丝,延长了光丝长度且增强了超连续谱辐射^[49]。2015年,Xi等从数值上仿真了微透镜阵列产生多丝的过程,并表示剧烈的时空演化和多丝竞争是光丝延长和超连续谱增强的主要原因^[50]。随后Camino等从实验上进一步探究了微透镜阵列产生多丝的过程^[51]。然而微透镜阵列存在数值孔径不可变、加工难度大、价格昂贵等缺点。为了克服如上缺点,作者团队数值仿真了利用二维声光调制的方式产生多丝^[52]。

随着成丝过程机理不断地被揭示,很多光丝操控方案展现出与其他光学前沿领域紧密结合的特点。2006年,Xi等仿真了从不同角度入射的两束光丝相互作用,发现通过选取合适的夹角,可以形成更长更稳定的光丝^[53],并在两年后通过相关实验验证了该结论^[54]。2011年,Shim团队在实验上以一定夹角的两束光控制光丝,再一次验证了上述结论^[55]。更有趣的是,2009年,Wu等用一束飞秒激光和其二次谐波激光平行传播,也同样可以控制吸引、融合、分裂等现象^[56]。另外,还有Cai等采用正交的两束飞秒激光传输,通过控制初始间距来控制成丝过程^[57]。到2013年,Ding等通过实验研究了非共线的两束光丝之间的能量交换^[58]。2006年,Kosareva等使用望远镜系统增强光丝光强和等离子体浓度^[59];Liu等对利用望远镜系统扩束系统来控制成丝起点进行了初

步的探索^[60]。2007 年, Sivan 等使用双透镜结构让成丝位置产生了 20 倍的延迟^[61]。相似的工作在 2014 年被 Jing 等实现^[62]。2014 年, Point 等将许多束小光丝通过长焦距透镜聚焦, 产生了一个量级等离子浓度的光丝^[63]。2007 年, Kandidov 等在使用网格产生多丝的基础上, 进一步优化了网格的尺寸大小^[64]。Walter 团队更是提出了利用液晶空间光调制器, 通过自适应算法后最小化空间啁啾, 从而控制成丝位置和长度^[65]。2009 年, 中国科学院物理研究所 Hao 等在光束的横截面上强加不同的波前曲率, 发现在合适条件下可以在传播方向上形成较长的等离子通道^[66]。2011 年, Durand 团队在两个交叉的光丝中发现了光栅结构等离子^[67]。同样的结论在实验上被 Liu 课题组验证^[68]。2006 年, Grow 团队探究了超高斯光束的成丝特性^[69]。2011 年, Biryukov 等探究了非理想高斯光束的成丝特性, 发现成丝距离能够被含有功率和 M^2 因子的 Marburger 公式估算, 但光丝的特性几乎不取决于初始光束质量^[70]。

随着衍射光学元件的兴起, 相位膜片被引入飞秒光丝领域。2009 年, Fu 等在实验上运用相位膜片延长光丝并提升其钳制光强^[71]。2013 年, Gao 等使用阶跃型相位板控制多丝阵列^[72]。另外, 自适应透镜的使用可以延长光丝的长度, 例如, 2009 年, Rohwetter 等实验上采用平缓变化的相位膜片控制多丝, 并提出好的相位分布有利于控制光丝^[73]。2013 年, Ionin 团队通过变形镜引入波前畸变, 发现引入球形畸变可以使得光丝延长一倍^[74]。在 2016 年, Englesbe 等更是采用遗传算法, 优化变形反射镜的形变量, 使之产生更长的光丝^[75]。对于一般的 Mathieu 光场, 可以将其概括为: 在一定距离之外的传输轴线上能够实现高的局部光强, 而在某一垂直于传输方向的方向上始终保持准周期性的光强分布。作者团队探索了基于振幅调制的伪 Mathieu 光场的成丝特性^[76], 发现其成丝过程会出现光轴上光强二次钳制的现象, 有利于提高成丝能量的利用率。

除了以上方法, 新型光束的发现激发起了飞秒光丝研究人员的极大热忱, 早在 2000 年, 就有 Fan 团队报道了他们观测到用 Bessel 光成丝, 具有自愈特性和增强钳制光强等优良特性^[77]。时隔 7 年后, Roskey 团队数值模拟了高光丝通过轴锥镜 (产生的是近似的 Bessel 光束) 成丝, 并且发现没有等离子体的自导引现象^[78]。随后, Pavel

课题组于 2008 年实验上使用 Bessel 光束, 使得光丝得到了延长^[79]。同样的结论在 2009 年被 Akturk 等验证^[80]。同年, Polynkin 团队又在 Bessel 光束的基础上加上时间维度上的啁啾调制, 得到更加容易形成的光丝^[81]。

与此同时, Akturk 等通过将传统的玻璃通过折射率匹配液, 产生可调 Bessel 光束, 并对不同参数的 Bessel 光束进行了相关研究^[82]。另外, Clerici 团队于 2010 年用不同材料的轴锥镜产生 Bessel 光^[83], 得到可控的轴上光丝。Zemljakov 等于 2013 年比较了使用抛物透镜和轴锥镜聚焦飞秒激光成丝特性^[84]。2014 年, Barbieri 所在团队在实验上使用 Bessel 光更是产生了螺旋形状的多丝^[85]。同年, Jukna 所在团队进一步研究了高阶 Bessel 光束成丝特性, 结果表明将会产生环形状的光丝^[86]。2015 年, Feng 等从仿真上证明了使用 Bessel 光束能使得光丝得到明显的延长^[87-88]。

除了 Bessel 光束之外, 另一种无衍射光束——Airy 光束在 2009 年成为光丝领域研究的热点。在 2009 年, Polynkin 等在 Science 杂志发表了一篇关于使用艾里光束产生弯曲的等离子通道的文章, 阐述了 Airy 光束成丝后的自愈和自加速特性^[89], 昭示着这种新型光束在光丝领域的广泛应用前景。同年, Kasparian 团队从原理上诠释了 Airy 光束的成丝物理本源^[90]。2010 年, Papazoglou 团队利用柱面透镜组产生了可调节的艾里光束进行了成丝实验^[91]。同年, Abdollahpour 等发现时空上均为艾里分布的光束能够形成高强度稳定的光丝, 并且具有时空双重自愈特性^[92]。2011 年, Kaminer 等针对 Airy 光束在成丝过程中的自加速特性进行了进一步的研究^[93]。2012 年, Panagiotopoulos 团队研究了有限能量艾里光束的动态成丝过程, 结果表明旁瓣光丝的产生将影响加速度大小^[94]。同年, Hu 等发现了在光折变介质中, 艾里光仍能保持加速特性^[95]。2013 年, Panagiotopoulos 团队又探究了环形艾里光束成丝能得到独特的光子弹, 并得出结论——特殊光束成丝具有明显的优势^[96]。在 2016 年, Panagiotopoulos 团队数值上证明了环形艾里光束导致光丝光强增强是由于自我产生的等离子造成的^[97]。

艾里光场成丝虽然可以产生抛物轨迹的光丝, 但是其光丝的横向偏移量很有限。并且, 当初始光束功率过大时, 克尔效应将会导致主瓣产生自聚焦, 横向加速能力减弱。为了克服如上问题, 作者团队提出了多主瓣横向加速的方法^[98]。通

过图 2 的成丝结果来看,随着主瓣数目的增加,拐弯光丝部分的长度出现了明显的延长。图 2 中,左图为纵向截面光强分布图,右图为不同传输距离上的光强分布图。

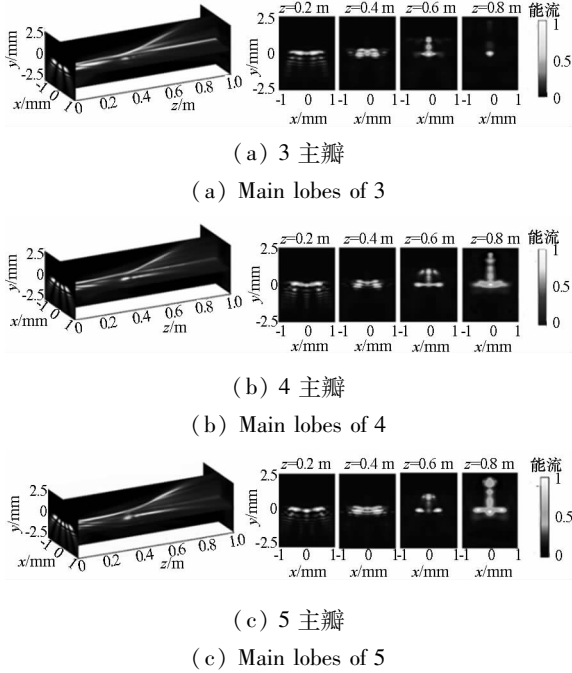


图 2 多主瓣修正抛物加速光场成丝结果
Fig. 2 Filamentation results of CAPBs

利用离散焦方法,经过图 3 所示的光场调制,作者团队展现了大气中蛇形光丝的形成过程,并深入地揭示了其内部机理。如图 3 所示,作者团队成功地构建了具有蛇形轨迹的光丝和等离子通道,并且验证了光丝的长度可以被延长。^[99]

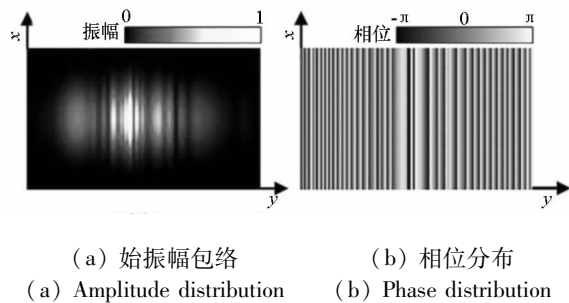


图 3 计算所得蛇光的初始振幅分布和相位场分布
Fig. 3 Calculated initial amplitude and phase distributions of snake beams

除了利用艾里光场构建各类特殊光丝,作者团队还从理论上研究了通过 Mathieu 调制产生多种类型光丝^[100],发现了自加速光能够沿预设椭圆度的椭圆轨迹成丝。通过将 Mathieu 加速光场转变为同相位对称分布和反相位对称分布,可以形成不同类型的光孤子,如图 4 所示。利用 Mathieu 加速光场构建出一种环形光子弹并且在

传输方向上出现了链条式的光强峰。

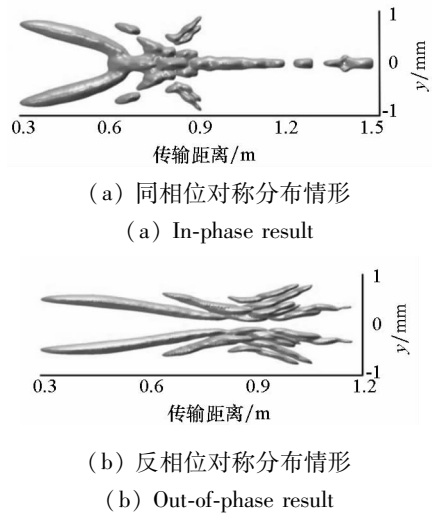


图 4 Mathieu 加速光场的等离子体通道的等值面分布图
Fig. 4 Plasma channels induced by Mathieu accelerating beams

4 结论

以上就是对 20 多年来光丝操控研究的简要总结。总的来说,可以将飞秒激光大气成丝操控分为两部分——时间维度操控和空间维度操控,操控方式方法呈现出多维多元化的趋势,对其的研究深度和广度都有巨大的空间等待着研究人员的进一步探索。

参考文献 (References)

- [1] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, et al. High-energy large-aperture Ti: sapphire amplifier for 5 PW laser pulses [J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5011–5014.
- [2] Braun A, Du D, Korn G, et al. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser-pulses in air [J]. Optics Letters, 1995, 20(1): 73–75.
- [3] Götte N, Winkler T, Meinel T, et al. Temporal airy pulses for controlled high aspect ratio nanomachining of dielectrics [J]. Optica, 2016, 3(4): 389–395.
- [4] Butkus S. Micromachining of transparent, semiconducting and metallic substrates using femtosecond laser beams [J]. Journal of Laser Micro / Nanoengineering, 2016, 11(1): 81–86.
- [5] Liu Y H, Sun H Y, Liu J S, et al. Laser-filamentation-induced water condensation and snow formation in a cloud chamber filled with different ambient gases [J]. Optics Express, 2016, 24(7): 7364–7373.
- [6] 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): 33201–33204.
- [7] Rohwetter P, Kasparian J, Stelmaszczyk K, et al. Laser-induced water condensation in air [J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 451–456.
- [8] Zhao X M, Diels J C, Wang C Y, et al. Femtosecond

- ultraviolet laser pulse induced lightning discharges in gases[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(3): 599–612.
- [9] Pépin H, Comtois D, Vidal F, et al. Triggering and guiding high-voltage large-scale leader discharges with sub-joule ultrashort laser pulses[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2532–2539.
- [10] Kasparian J, Rodriguez M, Méjean G, et al. White-light filaments for atmospheric analysis [J]. *Science*, 2003, 301(5629): 61–64.
- [11] Chin S L, Xu H L, Luo Q, et al. Filamentation “remote” sensing of chemical and biological agents/pollutants using only one femtosecond laser source[J]. *Applied Physics B*, 2009, 95(1): 1–12.
- [12] Brodeur A, Chiem C Y, Ilkov F A. Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(5): 304–306.
- [13] Marburger J H. Self-focusing: theory [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2005, 4(75): 35–110.
- [14] Bergé L, Kuznetsov E A, Rasmussen J J, et al. Self-focusing of optical pulses in media with normal dispersion[J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 1996, 13(9): 1879–1890.
- [15] Nuter R, Skupin S, Bergé L. Chirp-induced dynamics of femtosecond filaments in air [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 917–919.
- [16] Varela O, Alonso B, Sola I J, et al. Self-compression controlled by the chirp of the input pulse[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3649–3651.
- [17] Couairon A, Méchain G, Tzortzakis S, et al. Propagation of twin laser pulses in air and concatenation of plasma strings produced by femtosecond infrared filaments [J]. *Optics Communications*, 2003, 225(1/2/3): 177–192.
- [18] Bergé L. Boosted propagation of femtosecond filaments in air by double-pulse combination[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 065601.
- [19] Zhou B, Akturk S, Prade B, et al. Revival of femtosecond laser plasma filaments in air by a nanosecond laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11450–11456.
- [20] Papeer J, Botton M, Gordon D, et al. Extended lifetime of high density plasma filament generated by a dual femtosecond-nanosecond laser pulse in air[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(12): 089501.
- [21] Bergé L. Self-focusing dynamics of nonlinear waves in media with parabolic-type inhomogeneities[J]. *Physics of Plasmas*, 1997, 4(5): 1227–1237.
- [22] Schjødt-Eriksen J, Schmidt M R, Juul Rasmussen J, et al. Two-beam interaction in saturable media[J]. *Physics Letters A*, 1998, 246(5): 423–428.
- [23] Bergé L. Coalescence and instability of copropagating nonlinear waves [J]. *Physical Review E*, 1998, 58(5): 6606–6625.
- [24] Mlejnek M, Wright E M, Moloney J V. Power dependence of dynamic spatial replenishment of femtosecond pulses propagating in air [J]. *Optics Express*, 1999, 4(7): 223–228.
- [25] Mlejnek M, Kolesik M, Wright E M, et al. A dynamic spatial replenishment scenario for femtosecond pulses propagating in air—a route to optical turbulence? [J]. *Laser Physics*, 2000, 10(1): 107–110.
- [26] Liu W, Gravel J F, Théberge F, et al. Background reservoir: its crucial role for long-distance propagation of femtosecond laser pulses in air[J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(7): 857–860.
- [27] Liu W, Théberge F, Arévalo E, et al. Experiment and simulations on the energy reservoir effect in femtosecond light filaments[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2602–2604.
- [28] Chin S L, Petit S, Liu W, et al. Interference of transverse rings in multifilamentation of powerful femtosecond laser pulses in air[J]. *Optics Communications*, 2002, 210(3/4/5/6): 329–341.
- [29] Hao Z Q, Zhang J, Xi T T, et al. Optimization of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air using a pinhole[J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 16102–16109.
- [30] Daigle J F, Kosareva O, Panov N, et al. A simple method to significantly increase filaments’ length and ionization density[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94(2): 249–257.
- [31] Fibich G, Ilan B. Self-focusing of elliptic beams: an example of the failure of the aberrationless approximation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(10): 1749–1758.
- [32] Dubietis A, Tamošauskas G, Fibich G, et al. Multiple filamentation induced by input-beam ellipticity [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1126–1128.
- [33] Fibich G, Eisenmann S, Ilan B, et al. Control of multiple filamentation in air [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(15): 1772–1774.
- [34] Kandidov V P, Fedorov V Y. Properties of self-focusing of elliptic beams[J]. *Kvantovaya Elektronika*, 2004, 34(12): 1163–1168.
- [35] Fedorov V Y, Kandidov V P, Kosareva O G, et al. Filamentation of a femtosecond laser pulse with the initial beam ellipticity [J]. *Laser Physics*, 2006, 16(8): 1227–1234.
- [36] Dubietis A. Formation of periodic multifilamentary structures by use of highly elliptic light beams[J]. *Lithuanian Journal of Physics*, 2007, 47(1): 27–30.
- [37] Majus D, Jukna V, Valiulis G, et al. Generation of periodic filament arrays by self-focusing of highly elliptical ultrashort pulsed laser beams [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(3): 033843.
- [38] Tzortzakis S, Bergé L, Couairon A, et al. Breakup and fusion of self-guided femtosecond light pulses in air[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(24): 5470–5473.
- [39] Jin Z, Zhang J, Xu M H, et al. Control of filamentation induced by femtosecond laser pulses propagating in air[J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 10424–10430.
- [40] Golubtsov I S, Kandidov V P, Kosareva O G. Initial phase modulation of a high-power femtosecond laser pulse as a tool for controlling its filamentation and generation of a supercontinuum in air [J]. *Quantum Electronics*, 2003, 33(6): 525–530.
- [41] Méchain G, Couairon A, Franco M, et al. Organizing multiple femtosecond filaments in air[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(3): 035003.
- [42] Hosseini S A, Luo Q, Ferland B, et al. Competition of multiple filaments during the propagation of intense femtosecond laser pulses [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(3): 198–214.

- [43] Hao Z Q, Zhang J, Lu X, et al. Spatial evolution of multiple filaments in air induced by femtosecond laser pulses [J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 773–778.
- [44] Kandidov V P, AközbeK N, Scalora M, et al. A method for spatial regularisation of a bunch of filaments in a femtosecond laser pulse [J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(10): 879–880.
- [45] AközbeK N, Scalora M, Kosareva O G, et al. Towards a control of multiple filamentation by spatial regularization of a high-power femtosecond laser pulse [J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(2): 267–275.
- [46] Panagiotopoulos P, Papazoglou D G, Couairon A, et al. Controlling high-power autofocusing waves with periodic lattices [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4958–4961.
- [47] Fu Y, Gao H, Chu W, et al. Control of filament branching in air by astigmatically focused femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(2): 435–439.
- [48] Sun X D, Gao H, Zhang S W, et al. Numerical simulation of the generation of multiple laser filaments by an axicon array [J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(19): 1637–1643.
- [49] Camino A, Hao Z, Liu X, et al. High spectral power femtosecond supercontinuum source by use of microlens array [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 747–750.
- [50] Xi T T, Zhao Z J, Hao Z Q. Femtosecond laser filamentation with a microlens array in air [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(1): 163–166.
- [51] Camino A, Xi T T, Hao Z Q, et al. Femtosecond filament array generated in air [J]. *Applied Physics B*, 2015, 121(3): 363–368.
- [52] Hu Y Z, Nie J S, Sun K, et al. Generation of periodic filament arrays in air through two-dimensional acousto-optic modulation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(10): 2144–2148.
- [53] Xi T T, Lu X, Zhang J. Interaction of light filaments generated by femtosecond laser pulses in air [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(2): 025003.
- [54] Ma Y Y, Lu X, Xi T T, et al. Filamentation of interacting femtosecond laser pulses in air [J]. *Applied Physics B*, 2008, 93(2/3): 463–468.
- [55] Shim B, Schrauth S E, Hensley C J, et al. Controlled interactions of femtosecond light filaments in air [J]. *Physical Review A*, 2010, 81(6): 061803.
- [56] Wu J, Tong Y Q, Yang X, et al. Interaction of two parallel femtosecond filaments at different wavelengths in air [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3211–3213.
- [57] Cai H, Wu J, Lu P F, et al. Attraction and repulsion of parallel femtosecond filaments in air [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(5): 051802.
- [58] Ding P J, Guo Z Q, Wang X S, et al. Energy exchange between two noncollinear filament-forming laser pulses in air [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 27631–27640.
- [59] Kosareva O G, Panov N A, AközbeK N, et al. Controlling a bunch of multiple filaments by means of a beam diameter [J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(1): 111–122.
- [60] Liu W, Théberge F, Daigle J F, et al. An efficient control of ultrashort laser filament location in air for the purpose of remote sensing [J]. *Applied Physics B*, 2006, 85(1): 55–58.
- [61] Sivan Y, Fibich G, Eisenmann S, et al. Control of the filamentation distance and pattern in long range atmospheric propagation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 2779–2784.
- [62] Jing C R, Zhang H S, Chu W, et al. Generation of an air laser at extended distances by femtosecond laser filamentation with telescope optics [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3151–3156.
- [63] Point G, Brelet Y, Houard A, et al. Superfilamentation in air [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(22): 223902.
- [64] Kandidov V P, Dormidonov A E, Kosareva O G, et al. Optimum small-scale management of random beam perturbations in a femtosecond laser pulse [J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(1): 29–36.
- [65] Walter D, Eyring S, Lohbreier J, et al. Spatial optimization of filaments [J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(2): 175–178.
- [66] Hao Z Q, Salamé R, Lascoux N, et al. Multiple filamentation of non-uniformly focused ultrashort laser pulses [J]. *Applied Physics B*, 2009, 94(2): 243–247.
- [67] Durand M, Liu Y, Forestier B, et al. Experimental observation of a traveling plasma grating formed by two crossing filaments in gases [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(12): 121110.
- [68] Liu J, Li W X, Pan H F, et al. Two-dimensional plasma grating by non-collinear femtosecond filament interaction in air [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(15): 151105.
- [69] Grow T D, Ishaaya A A, Vuong L T, et al. Collapse dynamics of super-Gaussian beams [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5468–5475.
- [70] Biryukov A A, Panov N A, Volkov M V, et al. Filamentation of femtosecond laser radiation with a non-Gaussian transverse spatial profile [J]. *Quantum Electronics*, 2011, 41(11): 958–962.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] Rohwetter P, Queißer M, Stelmaszczyk K, et al. Laser multiple filamentation control in air using a smooth phase mask [J]. *Physical Review A*, 2008, 77(1): 013812.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] Hu Y Z, Nie J S, Sun K, et al. Femtosecond laser filamentation in air with zero-order pseudo Mathieu beam of different lobes [J]. *Optics Communications*, 2017, 394: 108–113.
- [77] Fan J, Parra E, Milchberg H M. Resonant self-trapping and absorption of intense Bessel beams [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(14): 3085–3088.
- [78] Roskey D E, Kolesik M, Moloney J V, et al. Self-action and

- regularized self-guiding of pulsed Bessel-like beams in air[J]. *Optics Express*, 2007, 15(16): 9893–9907.
- [79] Polynkin P, Kolesik M, Roberts A, et al. Generation of extended plasma channels in air using femtosecond Bessel beams[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15733–15740.
- [80] Akturk S, Zhou B, Francoa M, et al. Generation of long plasma channels in air by focusing ultrashort laser pulses with an axicon [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(1): 129–134.
- [81] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J. Extended filamentation with temporally chirped femtosecond Bessel-Gauss beams in air[J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 575–584.
- [82] Akturk S, Arnold C L, Prade B, et al. Generation of high quality tunable Bessel beams using a liquid-immersion axicon[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(16): 3206–3209.
- [83] Clerici M, Faccio D, Rubino E, et al. Space-time focusing of Bessel-like pulses [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3267–3269.
- [84] Zemljanov A A, Bulygin A D, Minina O V. Filamentation length for femtosecond laser radiation focused by conic and parabolic lenses [J]. *Russian Physics Journal*, 2013, 56(3): 286–290.
- [85] Barbieri N, Hosseinimakarem Z, Lim K, et al. Helical filaments[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(26): 863–905.
- [86] Jukna V, Milián C, Xie C, et al. Filamentation with nonlinear Bessel vortices [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25410–25425.
- [87] Feng Z F, Li W, Yu C X, et al. Extended laser filamentation in air generated by femtosecond annular Gaussian beams[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(3): 033839.
- [88] Feng Z F, Li W, Yu C X, et al. Influence of the external focusing and the pulse parameters on the propagation of femtosecond annular Gaussian filaments in air[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6381–6390.
- [89] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, et al. Curved plasma channel generation using ultraintense airy beams[J]. *Science*, 2009, 324(5924): 229–232.
- [90] Kasparian J, Wolf J P. Curved plasma channels: Kerr lens and Airy prism[J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2012, 4(4): 09039.
- [91] Papazoglou D G, Sunstov S, Abdollahpour D, et al. Tunable intense Airy beams and tailored femtosecond laser filaments[J]. *Physical Review A*, 2010, 81(6): 061807.
- [92] Abdollahpour D, Sunstov S, Papazoglou D G, et al. Spatiotemporal airy light bullets in the linear and nonlinear regimes [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 253901.
- [93] Kaminer I, Segev M, Christodoulides D N. Self-accelerating self-trapped optical beams [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(21): 213903.
- [94] Panagiotopoulos P, Abdollahpour D, Lotti A, et al. Nonlinear propagation dynamics of finite-energy Airy beams [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(1): 013842.
- [95] Hu Y, Sun Z, Bongiovanni D, et al. Reshaping the trajectory and spectrum of nonlinear Airy beams [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3201–3203.
- [96] Panagiotopoulos P, Papazoglou D G, Couairon A, et al. Sharply autofocused ring-Airy beams transforming into nonlinear intense light bullets [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2622.
- [97] Panagiotopoulos P, Couairon A, Kolesik M, et al. Nonlinear plasma-assisted collapse of ring-Airy wave packets [J]. *Physical Review A*, 2016, 93(3): 033808.
- [98] Hu Y, Nie J S, Sun K. Role of multiple filaments in self-accelerating actions of laser filamentation in air [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 128–135.
- [99] Hu Y, Nie J S, Sun K. Nonlinear propagation of laser filamentation in a pre-designed zigzagging fashion induced by initial modulation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(8): 1727–1732.
- [100] Hu Y, Nie J S. Laser filamentation in air via Mathieu modulation: ranging from trajectory-pre-designed curved filament to quasi-soliton and ring light bullet [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14944–14959.