



基于成丝效应的超快激光加工技术工业化应用研究之探析

季凌飞*, Amina, 燕天阳, 王文豪, 王亭入, 林真源, 杨强, 胡莉婷

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要: 激光成丝是超快激光在透明介质传输中的一种非线性光学现象, 来源于光克尔效应引起的激光光束自聚焦与弱电离产生的等离子体散焦之间的动态平衡, 对其超长传输物理特征非衍射性的调控在研发新一代超快激光材料加工技术上具有至关重要的作用。本文面向激光制造现代工程应用的发展需求, 对基于光丝效应的激光高精加工研究现状进行了调研和总结, 从激光成丝物理现象、基本机制和特征优势出发, 介绍了超快激光在气、液及固体不同介质中光丝引导加工工艺的研发进展, 对技术发展中的问题和前景进行了思考与分析。

关键词: 超快激光; 成丝效应; 透明介质; 高精加工

中图分类号: O437

文献标志码: A

Research progress of ultrafast laser industrial applications based on filamentation

Lingfei Ji*, Amina, Tianyang Yan, Wenhao Wang, Tingru Wang, Zhenyuan Lin,

Qiang Yang and Liting Hu

Institute of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: Ultrafast laser filamentation is an attractive nonlinear phenomenon as a consequence of dynamic balance between Kerr self-focusing and defocusing effect in the electron plasma generated through the ionization process. Achieving the regulation of the non-diffractive ultra-long transmission will play an important role in the development of novel ultrafast laser material processing technology. In this paper, the investigation on the research of ultrafast laser industrial application based on filamentation was introduced. From the physical feature, basic mechanism and characteristic advantages of filamentation effects, the representative research achievements on the laser applications of filamentary propagation induced by gas, liquid and solid different media were presented. The development problem and prospect of the technique were also considered and discussed.

Keywords: ultrafast laser; filamentation; transparent material; laser material processing

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.09.001

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(9): 851-861

1 引言

激光加工领域中, 通常将脉冲宽度小于 10^{-11} s 的

皮秒、飞秒激光称为超快激光。不同于连续或纳秒以上的长脉冲激光, 超快激光与物质的相互作用发生了本质的变化^[1]。超快激光对材料的激发过程可以避免受激电子的热弛豫(典型时间常数为 10^{-10} s 到 10^{-6} s), 从而形成一个准绝热(反应热除外)的“纯粹”光激发电子的“冷”加工过程, 理论上特别适合于材料的精

收稿日期: 2017-06-04; 收到修改稿日期: 2017-08-24

*E-mail: ncltji@bjut.edu.cn

细加工。但实际应用中会发现,即使在飞秒激光与材料的相互作用中,由于逸出物质热膨胀延时及多脉冲作用下的热积累^[2],加工材料中的热效应仍然无法避免,很多时候并不能达到人们所期望的加工精度和质量。超快激光与物质相互作用时会呈现出强烈的非线性光学效应,这种作用效果在飞秒激光制备透明介电材料微纳结构的研究中得到了广泛的关注和验证^[3,4]。利用超快激光器的强场非线性光学效应,有望克服目前超快激光材料加工的不足^[5],发展可面向工程应用的材料高精加工技术,进一步拓展激光加工技术的应用研究领域。

根据超快激光对透明材料能量输入的不同可将材料改性分为以下三种:均匀折射率变化(I型),双折射性(II型)和微孔隙/裂纹(III型)^[6,7]。I型改性是透明材料飞秒激光直写技术的基础机制,该技术是目前超快激光对玻璃等材料微加工应用的典型代表^[8-13],从最初各种玻璃光波导结构的制备^[14]已发展到三维微光子器件的制备。III型改性出现的微孔隙/裂纹也是超快激

光能量过大时常见的材料损伤行为。II型改性双折射现象可在很宽的激光工艺窗口内产生。正交偏振光学显微模式(crosspolarized optical microscope mode)可用于观察改性的双折射现象,改性区域沿激光入射方向延伸,长度随激光工艺参数而变(图1)。虽然对其产生机制尚无定论,但有研究表明这种改性来源于激光作用区的纳米级损伤,对纳米级损伤的利用可以获得高精度的材料加工效果。

不同的改性效果取决于材料中不同的能量输入条件,可以通过对光束的弱聚焦(soft focusing)或紧聚焦(tight focusing)等方式进行调控。当光束聚集功率超过一定的阈值(如空气传输中的3 GW)时,由于各种光学效应的综合作用,传播光束就会形成稳定的自引导传输,自身不产生明显的发散,在保持能量稳定传输的同时,以几乎恒定的尺寸保持长距离传输,传输长度至少超过瑞利长度数倍^[15,16],形成超快激光在材料介质中典型的非线性现象——光丝效应,前述超快激光对材料的II型改性即与这种光丝效应相关。1995年,

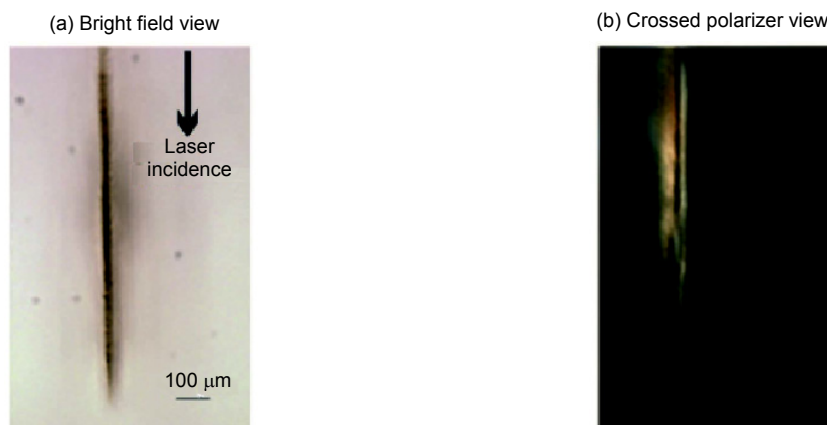


图1 典型的II型改性双折射区域^[6]。

Fig. 1 Typical modified birefringent regions (type II modification)^[6].

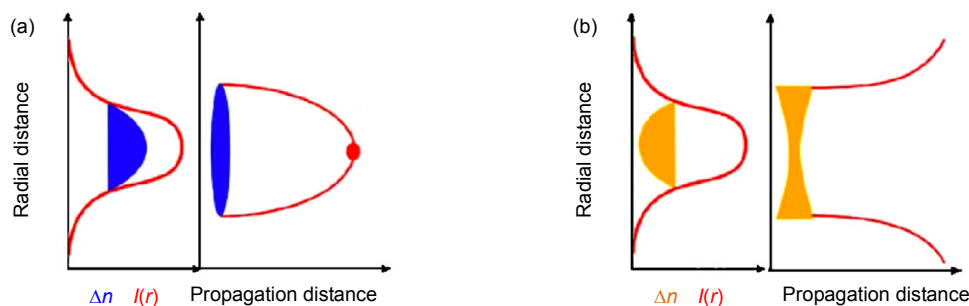


图2 (a) 克尔效应引起的光束自聚焦。(b) 电离对光束的散焦^[17]。

Fig. 2 (a) Self-focusing of a beam by optical Kerr effect. (b) Defocusing of the beam by the presence of plasma^[17].

Braun 等首次在飞秒激光脉冲自由入射至空气的实验中观察到该现象^[17]。至今,光丝效应已见于不同波长激光在不同介质中的传输^[18]。成丝的基本物理机制,广为接受的解释是光克尔效应引起的激光光束自聚焦与弱电离产生的等离子体散焦效应之间的动态平衡(图 2)^[8, 17],成丝长度取决于入射激光的峰值功率和传输过程中来源于多光子电离及等离子体逆韧致辐射吸收光子的损耗。

在克尔自聚焦、等离子体散焦以及非线性吸收等作用的动态平衡下,超快激光在透明介质的传输中会形成几倍于瑞利长度的高能量密度通道,而通道的截面尺寸通常在十微米到百微米之间,通过调制甚至可以突破 10 μm 的极限。借助这一高深宽比,高能量密度的“成丝”通道如图 3 所示,有望对蓝宝石等高硬脆介质材料带来加工工艺的新突破^[19]。

激光成丝包含有丰富的物理现象,这一现象自发现之初就已引起科研人员的极大兴趣,直至今日,在成丝物理效应模型、基本传输方程、高阶非线性效应等基础理论和实验研究方面成果斐然^[20],已先后提出以自引导模型^[21]、移动焦点模型^[22]和动态空间补偿模型^[23]三个模型为代表的若干物理模型来解释成丝现象的主要特性,为基于该效应的材料加工应用研究及其新概念和新现象的分析与解释奠定了坚实的理论基础。同时,近年来超快激光光源技术亦发展迅速,在光束质量、波长、脉宽、脉冲频率和功率密度等方面均有大幅改善,高功率超快强激光的商品化进程也在顺利推进之中^[24, 25]。一直以来,由于飞秒激光具有极窄的脉宽,易于获得超过自聚焦临界功率的高峰值功率,成为超快激光脉冲成丝研究的主要激光源。而根

据激光峰值功率为脉冲能量与脉宽的比值以及高能量皮秒激光的发展现状可知,在皮秒脉宽的条件下(脉宽 $\leq 10^{-11}$ s),通过提高脉冲能量也同样能够获得成丝所需的峰值功率条件^[26, 27]。而且,通过最近几年的飞速发展,皮秒激光光源系统的工业应用稳定性已达到了相当高的水平,这为面向工程化应用的超快激光成丝效应研究提供了重要的硬件基础。

伴随对超快激光非线性效应的更多研究和揭示,面向透明材料、硬质材料、超薄材料等在电子、生物、能源等各新兴领域需求的扩展和提高,采用超快激光(包括已具备工业化生产和管理条件的超快激光)的非线性效应(诸如成丝等)来寻找材料高精加工新工艺是激光先进制造发展的一个重要新方向。

2 工程应用研究实例

相对于固体介质,超快激光在气、液透明介质中的光丝效应较易产生、捕捉和调控,无论在理论和实验研究上都有着丰富的积累^[28-31]。将气、液介质中的激光成丝引入固体材料的高精加工,其独特的应用潜力和科学价值正在科研人员的不断探索和尝试中被逐步揭示。

2010 年在 Wolf 等人发表的论文中展示了光丝引导激光加工(filament-induced laser machining, FILM)技术对金属和生物材料的远程切割与制孔能力^[32]。研究中采用焦距 1 m 的长焦距透镜对飞秒激光(脉宽 80 fs 至 1 ps 可调)直径为 15 mm 的原始光斑进行弱聚焦,引导光丝以扫描方式进入所作用的固体材料对象(图 4),在激光输入能量为 1.1 mJ 的条件下,光丝长度可达 15 cm。

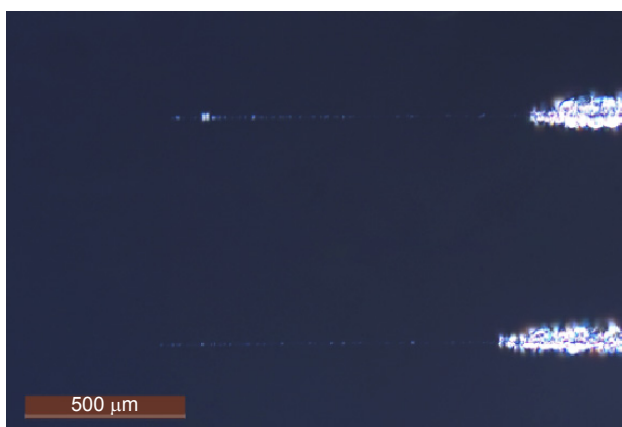
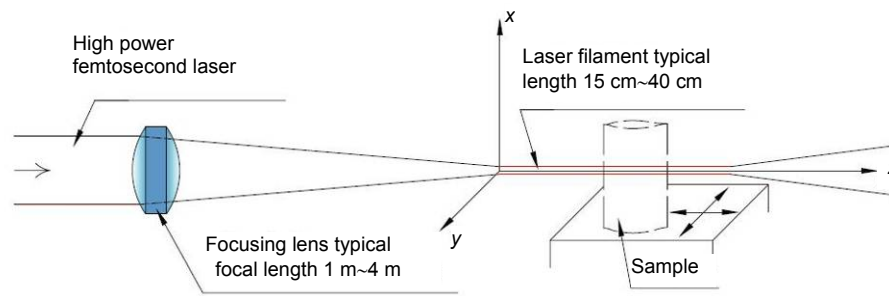


图 3 皮秒激光在蓝宝石介质中的成丝现象。

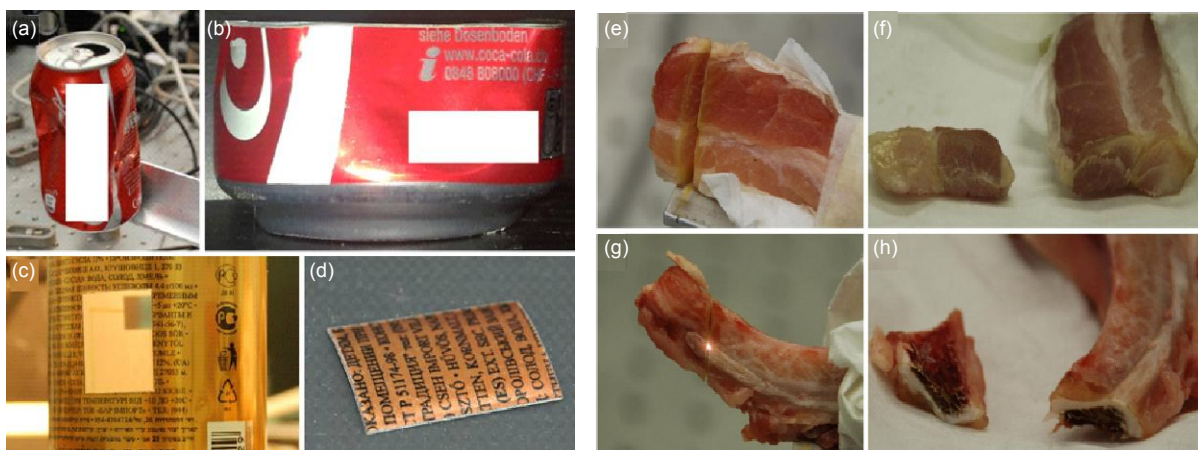
Fig. 3 Filamentation in sapphire irradiated by picosecond laser.

图4 光丝引导激光加工实验装置架构图^[32].Fig. 4 Filament-induced laser machining experimental set-up^[32].

虽然这种基于“聚焦延长(extended focus)”的光丝切割(filament saw)对材料的分离效率还有待提高,比较适用于箔状材料,但其独到的远程非聚焦特性可以很好地适用于复杂 3D 结构的精细加工。图 5(a)所示为扭曲变形的铝制易拉罐体(罐体直径 5 cm,壁厚 0.2 mm),采用 FILM 方式无需考虑依据工件外形的曲率变化和表面起伏进行实时聚焦调整或与工件旋转状态的匹配等问题,精准完成罐体的横向切割(图 5(b)),切边整齐,精度高,无热影响区和应力变形;图 5(c)、5(d)为在在曲面罐体上所获得的 4 cm×2 cm 的矩形窗口和切下的部分。采用该技术应用于细胞或生物材料的组织分离切割,分离路径不受材料形貌影响,分离精度高、质量好,分离面没有组织灼烧、热损伤或热残留等现象的出现(图 5(e)~5(h))。研究表明,光丝引导激光加工技术(FILM)的这些特征和优势都是常规超快激光切割所无法达到的,不仅在工业领域应用前景

巨大,未来在生物及医学微外科领域也会有重要的用武之地。

北京工业大学的季凌飞小组^[33]采用紧聚焦皮秒激光脉冲以气体为光丝引导介质,在大离焦条件下实现了曲面构件三维铣削型面的精密加工。该技术有效避免了因加工面高度变化对激光离焦量的干扰,仅通过严格约束激光束沿曲面聚焦扫描路径的坐标位置达到确保加工精度的曲面铣削目的,定位工艺简单,加工效率高,曲面轮廓适用性广。图 6 所示样品为工程实用件,传统加工方法为离子束刻蚀,工艺复杂,效率低;采用激光成丝铣削光束作用处仅现微小光点,无明显材料飞溅(图 6(a)),保证了加工质量和精度,铣削型面的表面粗糙度 R_a 值可达~70 nm 的高精度;整个激光加工工艺在空气环境下即可完成,单件加工时间由原离子束加工数小时亦缩短为约 20 min。将该技术辅以化学腐蚀方法^[34],在蓝宝石切割工艺中可直接

图5 光丝引导激光切割实例图^[32]. (a)~(d) 变形铝制易拉罐切割样本. (e)~(h) 生物组织(肉/骨)切割样本.Fig. 5 Filament-induced laser machined samples^[32]. (a)~(d) Deformed aluminum can samples. (e)~(h) Biological samples (flesh and bones).

实现亚微米级($R_a=800$ nm)精细切面(图 6(c)),切缝无锥度,使免除对这类高硬脆材料的后续磨抛工艺成为可能,大大降低了二次加工所带来的损伤风险。

对超快激光成丝效应工程化应用的初步研究所体现出的重要工业应用意义和巨大的发展潜值已开始受到产业界重视,美国罗芬-新纳技术公司对该类技术率先申请了专利保护,2014年8月该公司在激光对透明材料执行成丝的方法、装置和设备方面申请了一系列专利^[35-37],公开了通过对超快激光脉冲的突发聚焦形成材料外部束腰,并在材料内的延伸区域保持足够能量密度,以形成连续激光成丝但不导致出现 III 型改性的光学破坏而获得透明材料高精分割/分离/或标记的新技术。

以水为代表的透明液体是研究人员所关注的另一类重要的成丝介质。2014年立陶宛维尔纽斯大学以水作为激光光丝引导介质^[38, 39],获得了非常好的康宁玻璃圆形切割结果(图 7),玻璃厚度为 1.1 mm。康宁玻璃是经过化学强化的高硬质玻璃,是目前应用于智能手机、平板电脑、液晶电视等最广泛的重要电子视窗

材料,由于质硬易碎,一直挑战着切、铣、钻、磨等制造工艺的极限,维尔纽斯大学的研究成果体现了水介超快激光光丝切割技术在高硬质材料自由路径切割方面的发展优势。

图 8(a)是研究所用装置架构图,其中水膜厚度的选择是需要考虑的一个关键问题。模拟研究结果显示,对飞秒激光(脉宽 280 fs)而言,采用高于自聚焦功率阈值 100 倍的激光功率在水介质中的形成最佳成丝的传输距离约为 0.5 mm^[39],过厚的水膜层会引起入射激光能量的严重衰减,影响成丝及加工效果。以气体介质为引导的 II 型双折射改性常见于蓝宝石、单晶硅,而在有些玻璃类材料(钠钙玻璃、碱玻璃)中却难以见效,水介激光成丝弥补了这一不足。图 8(b)和 8(c)是实验对钠钙厚玻璃复杂轮廓的高精切割结果,采用 0.6 mm 厚度的水膜,让激光成丝最强点恰好落于玻璃片表面(图 8(d)),针对不同扫描速度均可获得最深切槽深度(图 8(e)),切削面的粗糙度计算值仅为 4 μm 。实验中作为成丝介质的水膜同时也起到了提高材料去除区域冷却效应和抑制裂纹的作用。

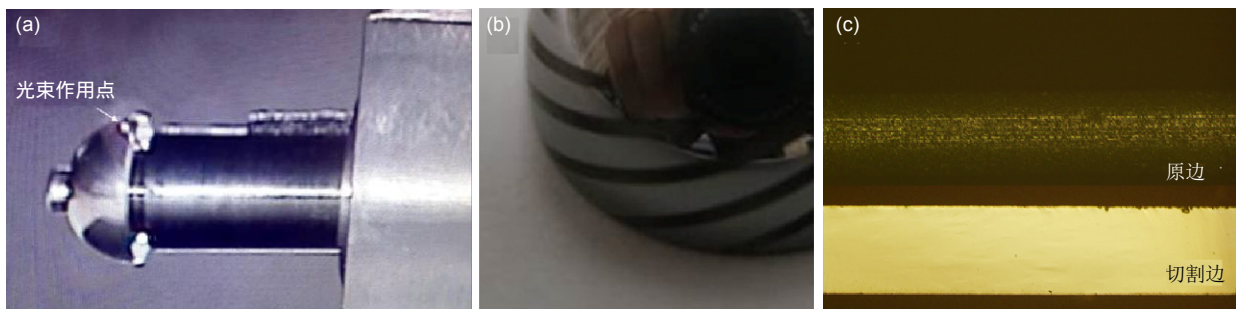


图 6 皮秒激光成丝加工实例图。(a) 皮秒激光成丝铣削工艺过程。(b) 皮秒激光成丝三维铣削型面实例。(c) 皮秒激光成丝加工蓝宝石切面。

Fig. 6 Samples fabricated by picosecond laser filamentation machining. (a) Machining process. (b) 3D milling sample. (c) Cut surface sample of fabricated sapphire.

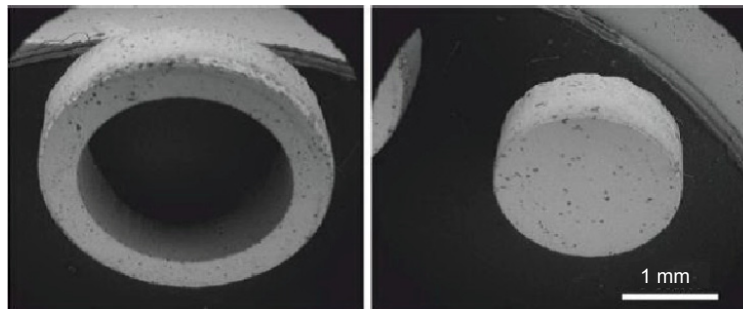


图 7 超快激光水介成丝切割康宁玻璃^[38]。

Fig. 7 Samples of Corning Gorilla glass fabricated by ultra-fast laser filamentation in water^[38].

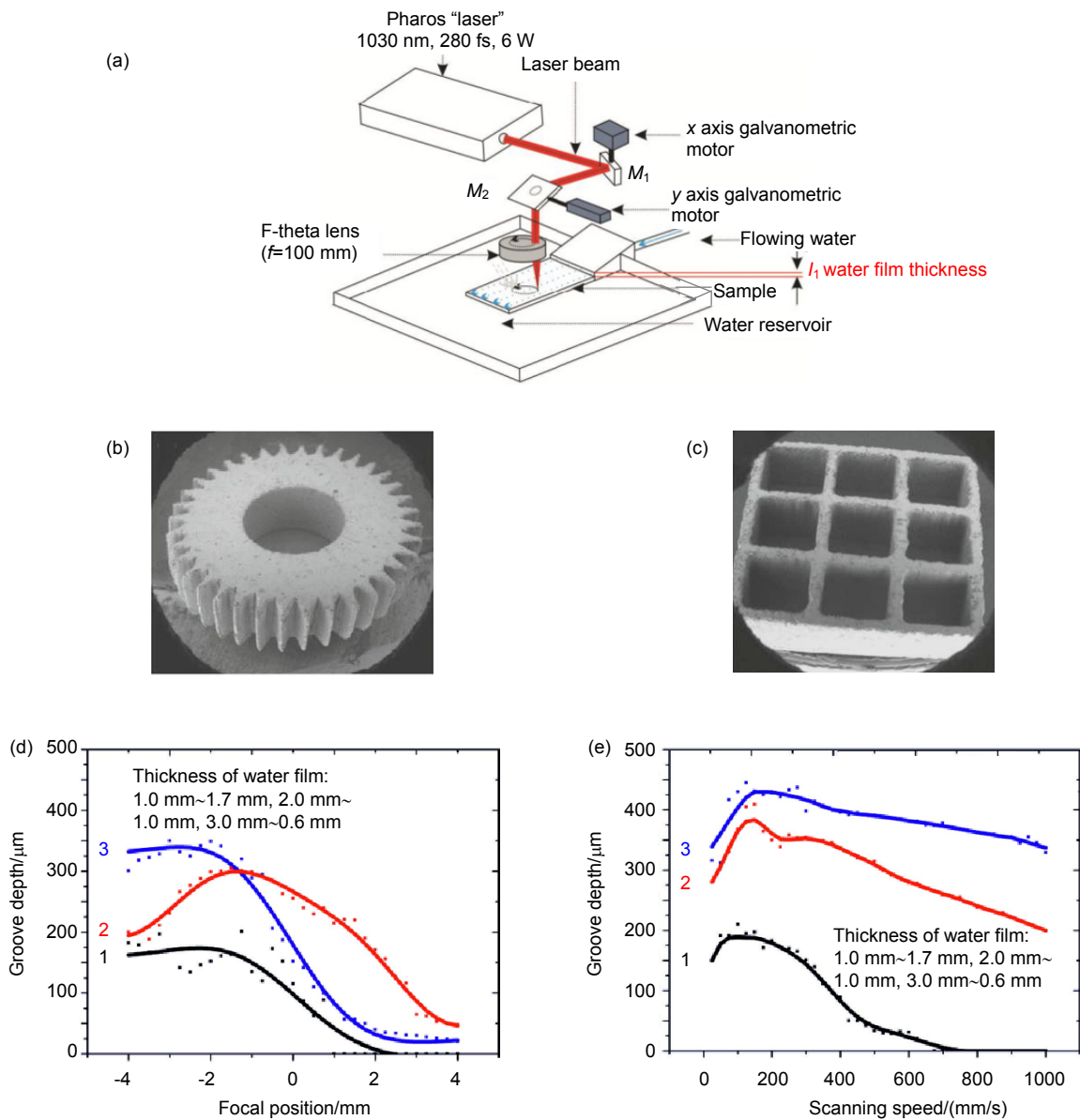


图 8 超快激光水介光丝切割实验^[38, 39]. (a) 实验装置架构图. (b), (c) 1 mm 厚钠-钙玻璃复杂切割件 SEM 图. (d), (e) 水膜厚度、激光工艺参数分析.
 Fig. 8 Cutting process of ultra-fast laser filamentation in water^[38, 39]. (a) Experimental set-up. (b), (c) Complex shape soda-lime glass cut samples. (d), (e) Thickness of water layer, laser parameters versus groove depth.

在 2016 年该课题组的最新研究报告中^[40],他们采用 Yb: KGW 飞秒激光(波长 1030 nm,脉宽 160 fs)对钠钙玻璃(1 mm 厚)、不锈钢(0.5 mm~2.5 mm 厚)、合成金刚石(0.25 mm~0.75 mm 厚)、SiC(0.4 mm 厚)、钕磁体(1.9 mm 厚)、多晶硅(0.4 mm 厚)、聚乳酸(PLA)高分子材料(1 mm 厚)、铜箔(40 μm~1 mm)和因瓦合金片(40 μm)等各种材料进行了水介超快激光光丝切割的实验研究,验证了光丝切割对 1 mm 透明材料的切割速度可以达到 0.3 mm/s,而对金属(厚度 1 mm)和半导

体材料(厚度 0.4 mm)的切割速度则分别为 0.15 mm/s 和 3 mm/s(图 9)。同样地,光丝切割依然体现了非常好的切割精度和切面垂直度,切面粗糙度仅约为 5 μm,而切缝锥度小于 2%。

目前针对固体介质中超快激光光丝传输效应的研究,主要以超连续辐射光谱特性及相关自相位调制、群速度色散、自陡峭与三次谐波等诸多前沿性物理问题为主^[41, 42]。超快激光在透明固体介质传输时所产生的成丝区域所钳制的超高功率密度(10^{10} W/cm²~ 10^{11}

W/cm^2)足以引起一般固体材料发生物相改变(相变)或直接去除,德国马克斯·玻恩非线性光学和短时间光谱学研究所 1997 年在小于 10^{-4} mbar 的真空环境中,以 120 fs 激光直接辐照石英玻璃(激光焦点聚焦于玻璃上表面),发现石英玻璃中的刻蚀微沟槽(channels)最初直径约 $200\ \mu m \sim 300\ \mu m$,但后部通道的直径会明显缩减至 $21\ \mu m$,该尺寸小于光束聚焦尺寸 $30\ \mu m$,且这一直径尺寸会一直保持到微沟槽底部(图 10(a))^[43]。通过 120 fs, 200 fs, 1.3 ps 和 2.3 ps 不同脉宽激光辐照的对比实验,发现真空环境中,激光对固体介质刻蚀长度的饱和值基本一致,相较脉宽影响,起更大影响作用的是激光功率值(图 10(b))。

固体介质超快激光成丝在应用上具有重要意义,

但由于激光在固体介质内部复杂的钳制效应及固体介质非均匀折射率的扰动等因素,成丝规律及很多内在机制尚未探究清楚,相比较气介和水介成丝,对固体介质中的成丝传输调控具有更大的难度,直接利用固体介质成丝实现材料高精分离的研究目前鲜见报道。有日本研究人员从材料连接应用的角度,利用固体介质成丝传输区域非线性吸收的局域热效应,进行了不同透明材料之间高精度空间定位的微连接研究,如图 11 所示。经聚焦后的飞秒激光束,通过两块叠加玻璃的桥接处产生的 $30\ \mu m$ 长的光丝区域实现可靠的强连接,同质无碱玻璃之间的连接强度为 9.87 MPa,而异质材料无碱玻璃-硅片(采用 1558 nm 的飞秒激光,该波长对 Si 透明)之间的连接强度则可达 3.74 MPa^[44]。

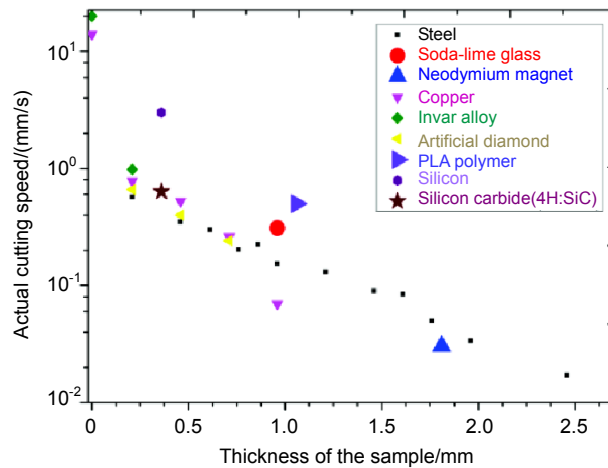


图 9 不同材料的水介光丝切割效果^[40]。

Fig. 9 Cutting throughput results for different thickness materials in water media^[40].

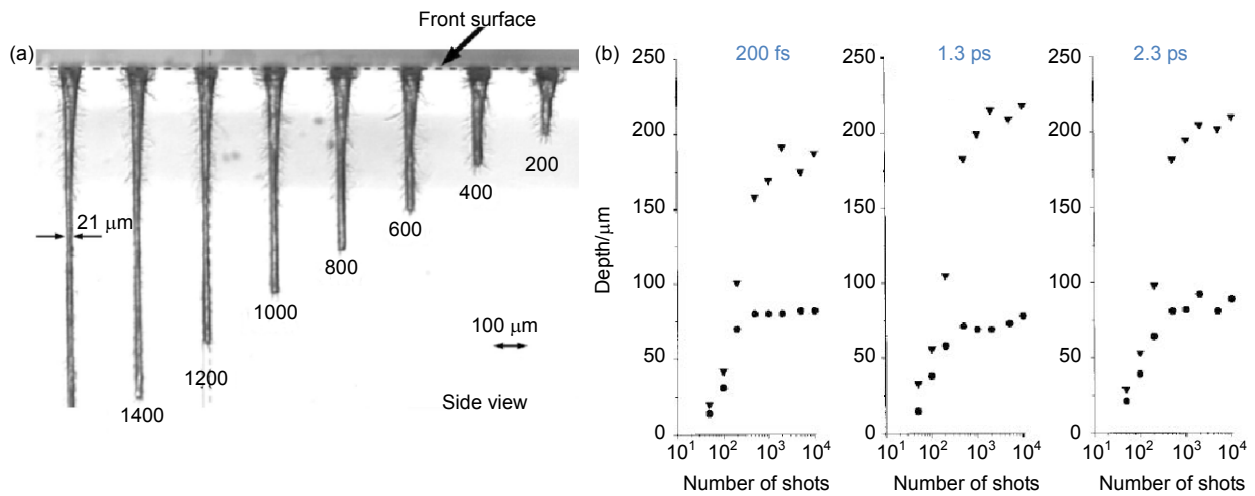


图 10 (a) 石英固体介质光丝刻蚀结果^[43]. (b) 不同参数作用影响^[43]。

Fig. 10 (a) Channels produced in quartz by symbolized filamentation effects^[43]. (b) Channel depths as a function of different laser parameters^[43].

由于玻璃表面并非理想的平整或附有杂质,施加压力使两片玻璃间的缝隙接近 $\lambda/4$ 是实现连接的必要条件。连接所用激光脉冲能量和扫描速率分别为 $18 \mu\text{J}$ 和 5 mm/s 。连接过程中,两片玻璃界面间光丝中心强电子等离子态的产生,经电子-声子弛豫产生晶格加热,当激光重复频率足够高(实验所用频率为 200 kHz)时,产生的热积累来不及耗散,导致区域内材料的熔化-熔合,形成玻璃的微连接,连接缝宽约为 $150 \mu\text{m}$ 。焦点位置对光丝连接效率也有十分重要的影响,通常放置在前置玻璃表面下 $1 \text{ mm} \sim 1.5 \text{ mm}$ 处。这种连接技术的最大优势在于连接无需焊料媒介,且有望实现不同热膨胀系数材料之间的直接强连接^[44-46],这对日益发展的电子、微电子及医学微器件的制造具有重大的

意义。

前述立陶宛维尔纽斯大学的光丝效应应用研究中,也尝试过固体介质激光光丝效应对玻璃的连接研究^[39](图 12)。

激光打标技术是现代激光加工最大的应用领域之一。不同于传统激光打标所利用的线性吸收效应,美国 IMRA 公司应用研究实验室基于光丝效应的超快激光加工研究,提出易换内部微打标(switchable inner micro-mark, SwIMM)技术,利用高重频超快激光脉冲对透明材料进行亚表面改性并实现了极高精度的微打标^[47],打标线的纵剖面具有典型的固体介质激光成丝非线性自聚焦机制的间隔(segment)现象(图 13)。该技术成果的特征之一,可以获得高光学对比度的信息图

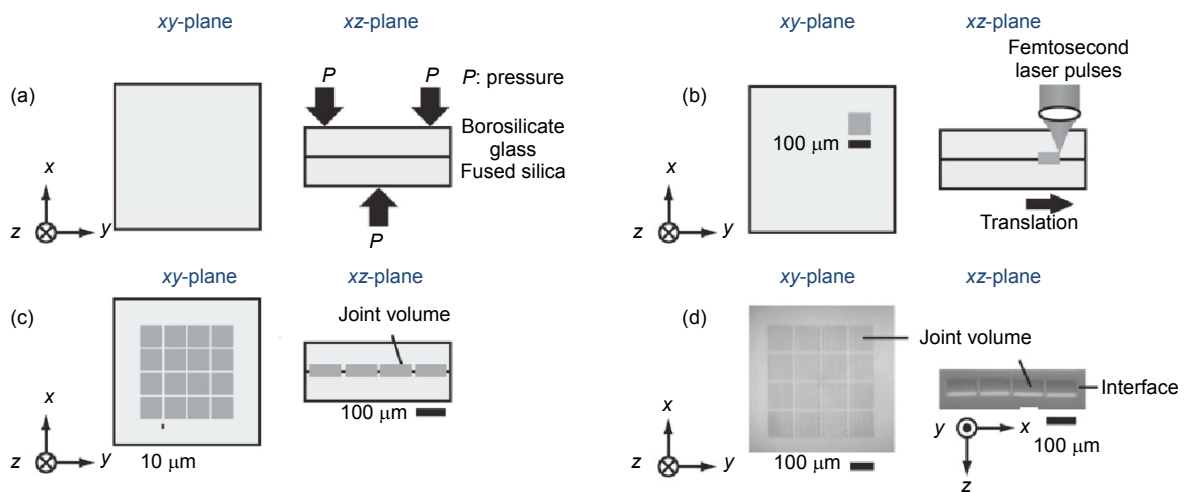


图 11 固体介质成丝微连接示意图^[44]。(a) 将一个样品放在另一个样品上并加压。(b) 飞秒脉冲激光聚焦于界面并平移样品。(c) 样品连接。(d) 飞秒激光辐照后样品俯视(xy平面)和侧视(xz平面)显微图。

Fig. 11 Schematic diagrams of laser joining process of filamentation in solid media^[44]。(a) Place one sample on another and press together。(b) Focus femtosecond laser pulses at the interface and translate the samples。(c) Join the samples。(d) Photomicrographs of top view (xy plane) and side view (yz plane) after femtosecond laser joining.

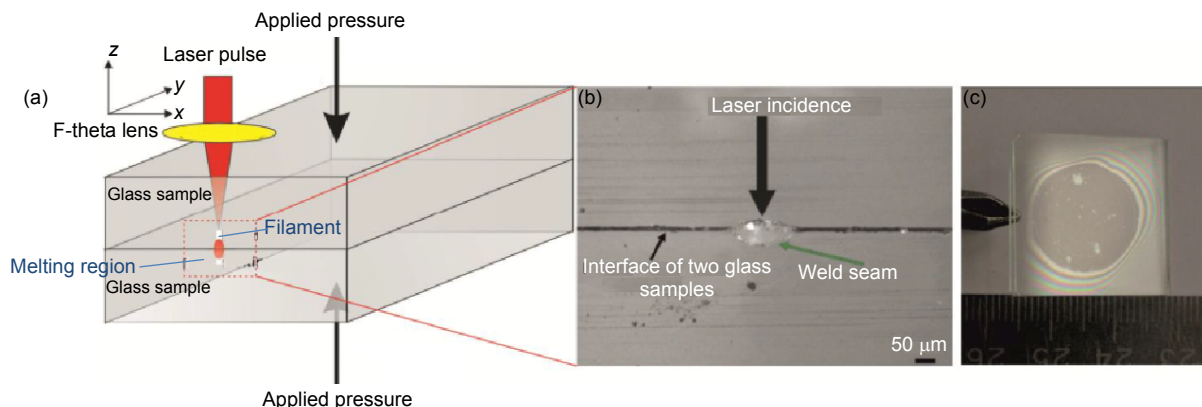


图 12 (a) 固体介质成丝微连接示意图^[39]。(b), (c) 实际连接样件的焊缝和连接样件^[39]。

Fig. 12 (a) Principal illustration of welding setup^[39]。(b), (c) Actual weld seam produced after irradiation and actual welded samples^[39]。

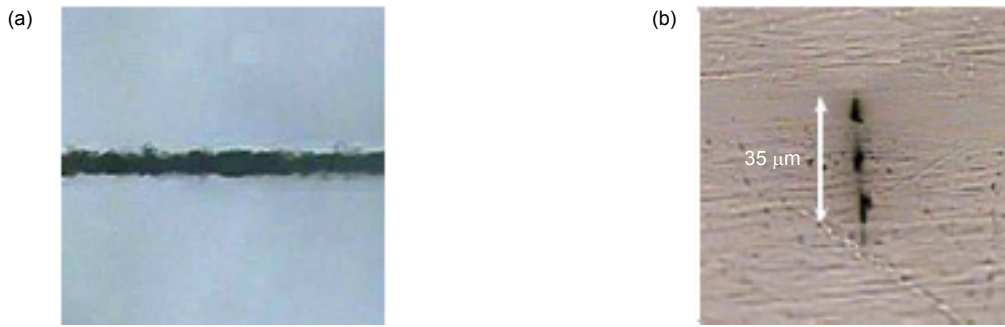


图 13 可控内部微打标聚碳酸酯内的自聚焦间隔^[47].
Fig. 13 Segment marks in in polycarbonate processed by scattering SwIMM^[47].

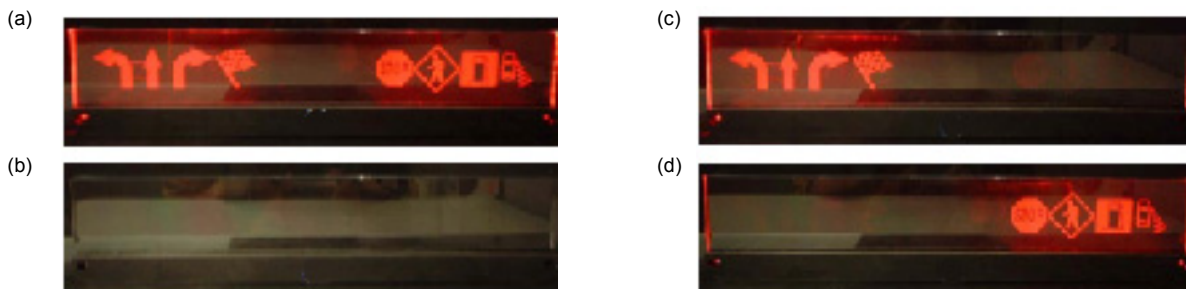


图 14 3 mm 厚聚碳酸酯基板超快激光可控内部微打标信息开-关态演示. (a) 全开态. (b) 全关态.
(c) 左信息开态. (d) 右信息开态^[47].
Fig. 14 ON and OFF states shown in 3 mm thick polycarbonate substrate fabricated by SwIMM. (a) All icons ON. (b) All icons OFF. (c) Left icons ON. (d) Right icons ON^[47].

案。自然光照条件下，打标区呈 Off 态，材料完整如常，无任何记号痕迹；而在特定光照条件下，On 态呈现，显现出清晰的打标信息(图 14)。特征之二，实现具有精准定位的微尺度亚表面打标。SwIMM 技术打标所制信息图案的微尺度及其在不同光照条件下表现出的开-关(On-Off)特性，对现代信息存储及保密技术的发展毋庸置疑地具有深远的研发意义。

3 分析与思考

随着超快激光器研发成熟度的日益提升，基于光丝效应的超快激光高精加工的新现象和新价值不断被研究人员发现和挖掘，但整体进展水平还处于探索和验证的初期阶段，为该方向的未来发展留下了很大的研发空间^[48]。

光丝效应的应用中，通过对光束的聚焦条件的调控可以获得超快激光在材料中的不同能量输入状态及其改性效应，存在着一种由外部聚集条件所决定的激光脉冲成丝与光学击穿两种行为之间的“竞争”；在成丝的传输过程中，受激光脉冲初始条件的影响，不同

物理模型所描述的作用机制之间也存在着“竞争”。此外，成丝效应中单丝的激发和引导是研究人员首先关注和希望掌控的，但单丝状态的激光光束在介质传播中并不稳定，伴随激光脉冲数变多，热等离子体会开始分段而变得不均匀。此外，由于激光过高的能量引入或激光初始脉冲强度的不均匀等带来的相位与强度扰动，还会出现激光成丝的多丝现象^[49, 50]，多丝之间的能量分布会根据彼此之间的相距距离而出现多丝独立传输或各自背景能量池的干涉。复杂的光丝效应，尤其是多丝竞争现象，为基于超快激光光丝效应的材料高精加工带来巨大的挑战，从光丝激发及传输机制出发，实现光丝空间分布有效的控制方案是技术突破的关键。

虽然激光光丝效应在材料高精加工中的应用前景已逐渐引起科研人员的重视，但目前的研究还集中在几个研究小组的工作中，要获得对超快激光尤其是固体介质中的光丝规律和演化机制更纵深的认识，需要不同学科的交叉协作，同时也需要依赖新型超强超快激光硬件性能的提升和全新实验手段的开发。皮秒激

光器在功率稳定性、设备制造成本及维护运行成本等方面更具有面向工程的应用优势^[51]。更有研究指出,皮秒强激光在成丝过程中的多光子电离及等离子逆韧致辐射的损耗会低于极高能的飞秒光子,有利于降低成丝功率阈值及延长成丝距离^[52]。但是皮秒脉宽的持续时间是飞秒激光的1000倍,实践中虽可以获得微米级深度的光丝制孔效果,却远远满足不了对材料深孔径、大切深、近零锥度激光高精加工的大部分需求。

4 总结

超快激光成丝效应作为新的科学现象,在成丝机制、调控等方面都还存在很多亟待解决的问题和尚未发掘之处,相信伴随着研究的深入,必然会在发现新的规律,建立新的概念和机制的基础上,寻找到超快激光材料高精可控加工新的突破点,带来切割精度及效率创新性地提高。随着以信息、能源、材料、生物和节能环保技术为代表的科技革命和产业革命的发生,越来越多的特软、特硬、特脆、高温、透明、超薄、热敏感等特殊材料将被广泛应用,激光加工因其对材料的广泛适应性和可控的热效应,已成为特种材料切割的重要工艺,虽然超快激光成丝效应工程化应用的关键技术问题和核心理论机制还在探索研究之中,但其所体现出的重要工业应用意义和巨大的发展前景已开始受到产业界重视,在精密仪器、电子制造、生物工程等方向将会不断地拓展出更多更新的应用领域。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51575013, 51275011)。

参考文献

- 程亚. 超快激光微纳加工: 原理、技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Dausinger S, Hügel H, Konov V I. Micromachining with ultrashort laser pulses: From basic understanding to technical applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5147**: 106–115.
- Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(4): 219–225.
- Cheng g, Rudenko A, D'Amico C, et al. Embedded nanogratings in bulk fused silica under non-diffractive Bessel ultrafast laser irradiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**(26): 261901.
- Bhuyan M K, Velpula P K, Colombier J P, et al. Single-shot high aspect ratio bulk nanostructuring of fused silica using chirp-controlled ultrafast laser Bessel beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(2): 021107.
- Butkus S, Paipulas D, Sirutkaitis R, et al. Rapid cutting and drilling of transparent materials via femtosecond laser filamentation[J]. *Journal of Laser Micro/Nano Engineering*, 2014, **9**(3): 213–220.
- Sudrie L, Franco M, Prade B, et al. Study of damage in fused silica induced by ultra-short IR laser pulses[J]. *Optics Communications*, 2001, **191**(3–6): 333–339.
- Tan Dezhi, Sharafudeen K N, Yue Yuanzheng, et al. Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: Fundamentals and applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2016, **76**: 154–228.
- De Aldana J R V, Moreno P, Roso L. Ultrafast lasers: A new frontier for optical materials processing[J]. *Optical Materials*, 2012, **34**(3): 572–578.
- He Fei, Liao Yang, Cheng Ya. Fabrication and integration of three-dimensional micro/nano-structures inside dielectric materials using femtosecond laser direct writing[J]. *Progress in Physics*, 2012, **32**(2): 98–113.
何飞, 廖洋, 程亚. 利用飞秒激光直写实现透明介电材料中三维微纳结构的制备与集成[J]. *物理学进展*, 2012, **32**(2): 98–113.
- Li Yan, Jiang Hongbing, Yang Hong, et al. Three-dimensional microfabrication in transparent materials with femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, **21**(2): 188–193.
李焱, 蒋红兵, 杨宏, 等. 透明材料飞秒激光三维微制备[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(2): 188–193.
- Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(2): 0201001.
夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. *中国激光*, 2013, **40**(2): 0201001.
- Li Helong, Chu Wei, Xu Huailiang, et al. Simultaneous identification of multi-combustion-intermediates of alkanol-air flames by femtosecond filament excitation for combustion sensing[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 27340.
- Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(21): 1729–1731.
- Kovachev L M, Georgieva D A. The long range filament stability: balance between non-paraxial diffraction and third-order nonlinearity[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8770**: 87701G.
- 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.
- Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. *Physics Reports*, 2007, **441**(2–4): 47–189.
- Zergioti I, Kyrkis K D, Papazoglou D G, et al. Structural modifications in fused silica induced by ultraviolet fs laser filaments[J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(19): 7865–7868.
- Hosseini S A, Herman P R. Method of material processing by laser filamentation: WO/2012/006736 Kind Code: A3[P]. 2012-01-19.
- Sheng Zhengming. Advances in high field laser physics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.
盛政明. 强场激光物理研究前沿[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
- Braun A, Korn G, Liu X, et al. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air[J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(1): 73–75.
- Brodeur A, Chien C Y, Ilkov F A, et al. Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(5): 304–306.

- 23 Mlejnek M, Wright E M, Moloney J V. Dynamic spatial replenishment of femtosecond pulses propagating in air[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(5): 382–384.
- 24 Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, et al. Machining of glass and quartz using nanosecond and picosecond laser pulses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8243**: 82430M.
- 25 Du Keming, Brüning S, Gillner A. High-power picosecond laser with 400W average power for large scale applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8244**: 82440P.
- 26 Zvorykin V D, Ionin A A, Levchenko A O, et al. Effects of picosecond terawatt UV laser beam filamentation and a repetitive pulse train on creation of prolonged plasma channels in atmospheric air[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, **309**: 218–222.
- 27 Tzortzakis S, Lamouroux B, Chiron A, et al. Femtosecond and picosecond ultraviolet laser filaments in air: experiments and simulations[J]. *Optics Communications*, 2001, **197**(1–3): 131–143.
- 28 Ni Jielei, Cheng Ya. Several new phenomena in femtosecond laser filamentation[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2014, **31**(1): 1–15.
倪洁蕾, 程亚. 飞秒激光成丝若干新效应研究进展[J]. 深圳大学学报理工版, 2014, **31**(1): 1–15.
- 29 Ju Jingjing, Liu Jiansheng, Wang Cheng, et al. Effects of initial humidity and temperature on laser-filamentation-induced condensation and snow formation[J]. *Applied Physics B*, 2013, **110**(3): 375–380.
- 30 Lin Zunqi, Chen Weibiao, Lou Qihong, et al. Review on the recent progress of laser frontiers in China[J]. *Science China Technological Science*, 2013, **56**(7): 1571–1588.
林尊琪, 陈卫标, 楼祺洪, 等. 我国近期激光前沿若干重要进展评述[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, **43**(9): 961–978.
- 31 Ju Jingjing, Liu Jiansheng, Wang Cheng, et al. Laser-filamentation-induced condensation and snow formation in a cloud chamber[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(7): 1214–1216.
- 32 Kiselev D, Woeste L, Wolf J P. Filament-induced laser machining (FILM)[J]. *Applied Physics B*, 2010, **100**(3): 515–520.
- 33 University Beijing Technology. Three-dimensional laser precise curved surface milling method: China, CN201610218392.8[P]. 2016-08-17.
北京工业大学. 一种激光三维精细曲面铣削的方法: 中国, CN201610218392.8[P]. 2016-08-17.
- 34 Yan Tianyang, Ji Lingfei, Li Lin, et al. High precision processing of sapphire with submicron cut-surface Roughness by chemical-assisted picosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(10): 1002002.
燕天阳, 季凌飞, 李林, 等. 蓝宝石亚微米级精细切面化学辅助皮秒激光成丝切割研究[J]. 中国激光, 2017, **44**(10): 1002002.
- 35 Rofin Sinar Technologies Inc. Method and apparatus for non-ablative and/or photo acoustic compression machining a transparent target: China, CN201410379877.6[P]. 2015-02-11.
罗芬-新纳技术公司. 激光成丝在透明材料中非烧蚀光声压缩加工的方法和装置: 中国, CN201410379877.6[P]. 2015-02-11.
- 36 Rofin Sinar Technologies Inc. System for performing laser filamentation within transparent materials: China, CN201410380104.X[P]. 2015-02-11.
罗芬-新纳技术公司. 用于在透明材料内执行激光成丝的系统: 中国, CN201410380104.X[P]. 2015-02-11.
- 37 Rofin Sinar Technologies Inc. Method and device for performing laser filamentation within transparent materials: China, CN201410380147.8[P]. 2015-02-11.
罗芬-新纳技术公司. 用于在透明材料内执行激光成丝的方法和装置: 中国, CN201410380147.8[P]. 2015-02-11.
- 38 Butkus S, Gaižauskas E, Paipulas D, et al. Rapid microfabrication of transparent materials using filamented femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics A*, **114**(1): 81–90.
- 39 Butkus S, Paipulas D, Viburyš Ž, et al. Rapid microfabrication of transparent materials using a filamented beam of the IR femtosecond laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **8972**: 897216.
- 40 Butkus S, Alesnikov A, Paipulas D, et al. Micromachining of transparent, semiconducting and metallic substrates using femtosecond laser beams[J]. *Journal of Laser Micro/ Nanoengineering*, 2016, **11**(1): 81–86.
- 41 Liu Jun, Chen Xiaowei, Liu Jiansheng, et al. Spectrum reshaping and pulse self-compression in normally dispersive media with negatively chirped femtosecond pulses[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(2): 979–987.
- 42 Feng Liubin, Lu Xin, Liu Xiaolong, et al. Off-focus generation of strong super-continuum emission in fused silica using high power femtosecond laser pulses[J]. *Acta Physics Sinica*, 2012, **16**(17): 174206–1–6.
冯柳宾, 鲁欣, 刘晓龙, 等. 飞秒激光离焦抽运熔融石英产生超连续白光的实验研究[J]. 物理学报, 2012, **16**(17): 174206–1–6.
- 43 Varel H, Ashkenasi D, Rosenfeld A, et al. Micromachining of quartz with ultrashort laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 1997, **65**(4–5): 367–373.
- 44 Watanabe W, Tamaki T, Itoh K. Filamentation in laser microprocessing and microwelding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6733**: 67332F.
- 45 Watanabe W, Onda S, Tamaki T, et al. Space-selective laser joining of dissimilar transparent materials using femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(2): 021106.
- 46 Tamaki T, Watanabe W, Itoh K. Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at 1558 nm[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(22): 10460–10468.
- 47 Yoshino F, Zhang Haibin, Arai A. Ultrashort pulse laser processing of transparent materials[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2009, **4**(3): 212–217.
- 48 Courvoisier F, Stoian R, Couairon A. Ultrafast laser micro- and nano-processing with nondiffracting and curved beams: invited paper for the section: hot topics in ultrafast lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **80**: 125–137.
- 49 Juodkasis S, Mizeikis V, Gaižauskas E, et al. Studies of femtosecond pulse filamentation in glasses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6053**: 60530R.
- 50 Gao Hui, Zhao Jiayu, Liu Weiwei. Control of multiple filamentation induced by ultrafast laser pulses[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(3): 598–607.
高慧, 赵佳宇, 刘伟伟. 超快激光成丝现象的多丝控制[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(3): 598–607.
- 51 Plat K, von Witzendorff P, Suttman O, et al. Process strategy for drilling of chemically strengthened glass with picosecond laser radiation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, **28**(2): 022201.
- 52 Galinis J, Tamošauskas G, Gražulevičiūtė I, et al. Filamentation and supercontinuum generation in solid-state dielectric media with picosecond laser pulses[J]. *Physical Review A*, 2015, **92**(3): 033857.