

# 飞秒激光微纳加工光纤功能器件研究进展

李金健<sup>1</sup>, 刘一<sup>2</sup>, 曲士良<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学(威海)理学院, 山东 威海 264209

**摘要** 光纤功能器件具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、抗腐蚀、易于集成复用等独特优势,在微机械结构、生物医疗、海洋探测、航空航天等领域有着巨大的应用前景。飞秒激光具有超窄的脉冲宽度,在与材料相互作用时能够有效地避免热效应,具有较高的加工精度,因此被广泛应用于光纤功能器件制备。目前,利用飞秒激光直写技术、飞秒激光双光子聚合技术和飞秒激光水击穿技术等已制备出稳定可靠的三维高分辨率微纳光纤功能器件。主要介绍了光纤光栅、光纤干涉仪、光波导等光纤功能器件的飞秒激光加工技术发展状况,展望了飞秒激光加工技术的应用前景。

**关键词** 激光光学; 飞秒激光; 微纳加工; 光纤传感; 微流芯片

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111402

## Research Progress on Optical Fiber Functional Devices Fabricated by Femtosecond Laser Micro-Nano Processing

Li Jinjian<sup>1</sup>, Liu Yi<sup>2</sup>, Qu Shiliang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>2</sup>Department of Optoelectronics Science, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

**Abstract** Optical fiber functional devices have huge application prospects in micromechanical structures, biomedical, ocean detection, aerospace, and other fields because of their unique advantages such as small size, high sensitivity, anti-electromagnetic interference, corrosion resistance, easy integration, and multiplexing. Femtosecond laser with ultra-narrow pulse widths can effectively avoid thermal effects and can achieve high-precision optical functional structures when interacting with materials, which has been used in fiber functional device manufacturing. At present, various three-dimensional micro-nano fiber functional devices with good stability and high resolution have been prepared by femtosecond laser direct writing technology, femtosecond laser two-photon polymerization technology, and femtosecond laser-induced water breakdown technology. Herein, we introduce the recent development of fiber grating, fiber interferometer, optical waveguide, and other micro-optical devices. Further, we analyze the future development directions and prospects of femtosecond laser micro-nano processing technology.

**Key words** laser optics; femtosecond laser; micro-nano processing; optical fiber sensing; microfluidic chip

**OCIS codes** 140.3390; 130.3120; 230.3120; 230.1150

## 1 引言

在飞秒激光出现之前,传统的材料加工方法主要有机械加工、光刻、干湿蚀刻等,这些工艺一般流程繁琐、精度较低。之后,出现了激光蚀刻、电子束

蚀刻和聚焦离子束蚀刻,虽然这三种技术具有分辨率高、加工结构精细等优点,但需要昂贵的真空设备,工艺复杂,加工时间长,效率较低。传统激光微加工技术,如激光蚀刻、电子束蚀刻和聚焦离子束蚀刻,主要机理是对输出激光进行聚焦后,对材料目标

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-05-04; 录用日期: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(11874010)

\* E-mail: slqu@hit.edu.cn

区域进行加工,使材料在焦点处发生熔化,实现微结构的制备,利用该技术制备结构的精度通常在几十微米量级;准分子激光加工技术是依靠短波长的激光与材料的光化学反应来实现结构的微加工,尺度在微米量级。在激光微加工过程中,器件微型化对其精度和分辨率也提出了更高的要求,这也促使激光微加工技术不断地向着微小尺度的应用深入发展。相比于传统的材料加工技术,飞秒激光利用锁模和啁啾放大技术将脉冲的时域宽度压缩到飞秒量级,将脉冲能量在数个飞秒内瞬间释放,因此具有很高的峰值功率。超短脉冲宽度的飞秒激光在与物质瞬态作用时,聚焦区域的激光能量密度极高,表现出强烈的非线性,通过多光子吸收和多光子电离等非线性过程,可将材料瞬间激发到高温高压等离子体态,然后高温高压等离子体会发生绝热膨胀。当飞秒激光聚焦在材料表面时,可通过诱导产生的等离子体的快速喷发制备出精细微纳结构,若飞秒激光聚焦在透明体材料内部则会引发微爆,使材料发生改性<sup>[1-4]</sup>。

利用飞秒激光在不同种类材料<sup>[5-6]</sup>中加工微纳结构<sup>[3,7-9]</sup>时,可以有效避免热效应和冲击波效应对制备结构质量的影响,因而加工优势明显,主要体现在加工的微结构精度和分辨率高、制备结构的三维多样复杂性和冷加工等方面,利用飞秒激光的单光子及双光子聚合技术已经在多种材料<sup>[10-15]</sup>中制备出高分辨率的三维微纳结构。

随着光纤通信技术的迅速发展,高效的信息处理和系统集成显得尤其重要,光纤功能器件也随之迅速发展。相比于传统的光功能器件,全光纤功能器件如微传感器、耦合器、光纤光栅、波分复用器等,由于其体积小、损耗小、成本低、在光纤通信领域潜力巨大,成为光学领域的研究热点。采用激光蚀刻、电子束蚀刻和聚焦离子束蚀刻等技术加工光纤功能器件时工艺复杂、效率较低,且容易使焦点周围的光纤区域发生熔化,精度通常在几十微米量级,加工光纤功能器件时难度较大。飞秒激光加工的光纤功能器件具有结构紧凑、尺寸小、易于复用集成的优势,目前已应用于传感<sup>[16-17]</sup>、医学<sup>[18-19]</sup>和生命科学<sup>[20-21]</sup>等多个领域。在玻璃、晶体等透明介质材料中,飞秒激光可诱导出结构精细可控的光波导、光纤干涉仪、光存储器等各种光学微器件<sup>[22]</sup>。2017年,Chen等<sup>[23]</sup>利用飞秒激光在 $\text{Cr}^{3+}$ 离子掺杂的铝硅酸盐玻璃、 $\text{ZnO-TeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 体系玻璃<sup>[24]</sup>等透明体材料中诱导出多功能微结构,研究了其光存储性能,Qiu

等<sup>[25-26]</sup>还研究了飞秒激光在玻璃和晶体等透明材料中诱导的自组织纳米光栅的形成过程和结构特征。电子科技大学饶云江课题组利用飞秒激光和157 nm准分子激光,在没有特殊的预处理和掺杂下,改变石英光纤的折射率,通过光纤表面及内部设计制备出各种微结构,研制出了应力<sup>[27-28]</sup>、温度<sup>[29]</sup>、压力<sup>[16,30]</sup>等多种高灵敏度传感器。

本课题组也一直致力于研究微光学器件的飞秒激光制备工作,在光纤传感、微流芯片等领域,设计制备出高灵敏光纤液体折射率传感探头<sup>[31]</sup>和具有生物兼容性的高灵敏光纤液体温度传感探头<sup>[32-34]</sup>。2014年,该光纤传感器飞秒激光制备技术被世界著名期刊*Laser Focus World*作为“NewsBreaks”进行了特别报道,并被*Laser Focus World*评为“2014年光子技术领域20个顶尖技术之一”<sup>[35-36]</sup>。

## 2 飞秒激光直写技术

### 2.1 飞秒激光直写机理

飞秒激光直写技术将输出激光聚焦到目标物的待加工区域,对其进行扫描,实现对部分区域的改性或者消除。飞秒激光脉冲聚焦在材料表面时,可通过诱导产生的高温高压等离子体的快速喷发制备出精细微纳结构,若飞秒激光聚焦在透明体材料内部时,产生的高温高压等离子体绝热膨胀会引发微爆而使材料发生改性。而且,飞秒激光脉冲持续时间在飞秒量级,激光辐照区域周围的热扩散几乎可以忽略,因而加工精度较高。以飞秒激光与晶体材料相互作用为例加以说明,飞秒激光脉冲能量能快速且准确地沉积到晶体材料内部,在飞秒量级时间内产生高温高压等离子体,尽管等离子体的寿命在纳秒量级,电子-晶格耦合时间一般在几十皮秒,但由于等离子体在材料表面向外喷发的时间一般在几皮秒量级,电子仅有非常少的能量转移至晶格中,因此飞秒激光加工技术热致效应很小,加工精度较高。此外,飞秒激光脉冲具有超高的峰值功率,脉冲能量大,因此其加工的目标材料种类较多。近年来,飞秒激光直写技术发展迅速,研究成果显著<sup>[17,37]</sup>,制备出了一些特殊材质的特殊结构光栅<sup>[38-41]</sup>,2012年Dai等<sup>[42]</sup>使用飞秒脉冲激光在二氧化硅内部制备了3D自组装纳米光栅,如图1所示,通过控制激光偏振方向,该自组织纳米光栅可以在熔融二氧化硅内部的三维空间中旋转,该技术在于透明材料中刻写周期性结构制备方面有着重大意义。

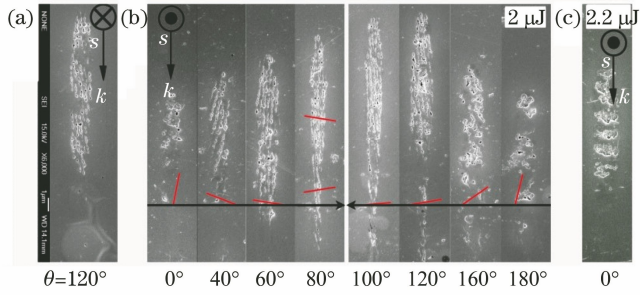


图1 自组装纳米光栅在横截面上的SEM图像<sup>[42]</sup>

Fig. 1 SEM images of self-organized nano-gratings in the transversal cross section of written lines<sup>[42]</sup>

在制备三维微纳器件领域,直接在硅片上制作悬浮结构仍然具有挑战性。2016年Ma等<sup>[43]</sup>提出了一种新的悬浮结构制作方法,利用飞秒激光直写技术制作柔性悬浮结构,然后用湿化学碱(KOH)蚀刻。悬浮结构制备过程简单灵活且容易操作。图2所示为飞秒激光直写技术制备的各类微纳三维结构,包括线型、盘状、螺旋和五边形等悬浮结构,该技术在悬浮微纳结构制作方面潜力巨大。

2017年Liu等<sup>[44]</sup>结合干蚀刻和飞秒激光直写(FsLDW)技术,提出了一种构造任意梯度高度的无掩模硅结构加工方法。通过控制激光功率、刻蚀时间等在硅片表面可以实现各种复杂的三维结构,如图3所示。该方法有望解决传统光刻技术的难题并克服FsLDW技术制作三维梯度结构时的常见困难。具有非平面基板的三维加工能力的FsLDW技术结合干蚀刻法,在微电子、微光学、微电子机械等领域有着巨大应用潜力。

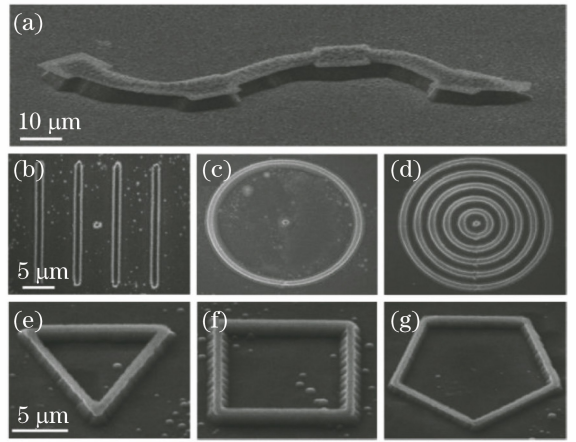


图2 各种悬浮结构(线状、盘状、螺旋体和五边形结构)的SEM图像<sup>[43]</sup>

Fig. 2 SEM images of various designed suspended structures (line, disk, helix, and pentagon structures)<sup>[43]</sup>

2011年Luo等<sup>[9]</sup>通过改变飞秒激光的聚焦深度(FD),在硼硅酸盐玻璃中诱导出不同尺寸和数量

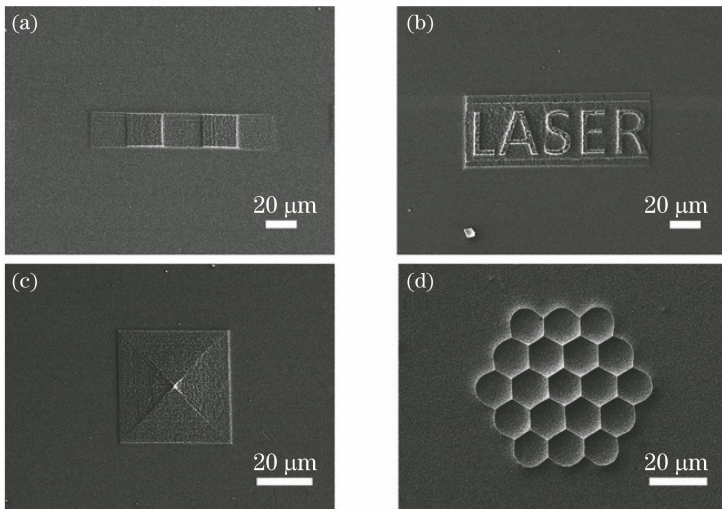


图3 各种复杂的三维结构<sup>[44]</sup>。(a)三层台阶;(b)矩形台阶上的“LASER”;(c)矩形金字塔;(d)凹面微透镜阵列

Fig. 3 Complicated 3D structures<sup>[44]</sup>. (a) Three-level steps; (b) the word “LASER” on a rectangular step;

(c) rectangular pyramid; (d) concave micro lens array



密度的永久性微尺度气泡,如图4所示。随着聚焦深度的增加,气泡的平均尺寸逐渐减小。硼硅酸盐玻璃中的永久性气泡是由飞秒激光诱导写入该区域

底部的。生成气泡的分布、大小和数量密度与激光能量密度密切相关,这在制造衍射气泡光栅、气泡物理的研究领域有着重要意义。

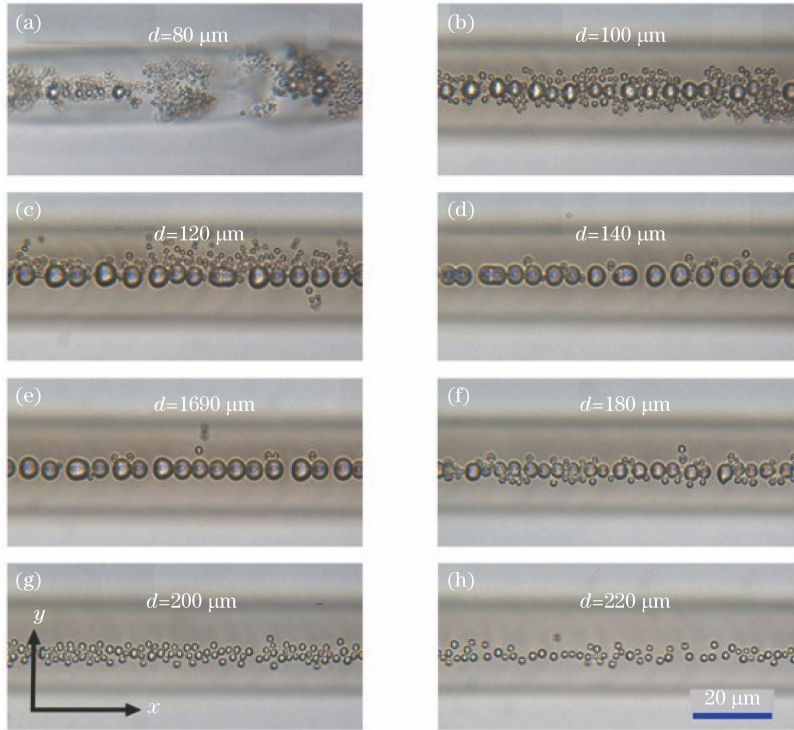


图4 在不同聚焦深度下诱导的气泡<sup>[9]</sup>

Fig. 4 Bubbles induced at different FDs<sup>[9]</sup>

## 2.2 飞秒激光直写波导

飞秒激光直写波导技术是基于飞秒激光诱导材料内部局域折射率产生变化,一般将飞秒激光聚焦到材料内部,通过计算机控制的三维平台移动样品,将所设计的结构刻写在材料内部形成光波导。目前,飞秒激光直写波导技术发展迅速,在直写波导的基础上,还能够实现对复杂波导功能器件如滤波器<sup>[45]</sup>、耦合器<sup>[46-47]</sup>等的制备,应用潜力巨大。

2009年Pospiech等<sup>[46]</sup>利用飞秒激光直写技术和电子束成型技术在石英中刻写了波导耦合器,在一次扫描过程中,可以同时写入分离的两个或多个波导,并对其导向性能和耦合性能进行了分析,各项数据指标优异,该技术为飞秒激光直写复杂类型波导功能器件提供了可能,也为光子器件如耦合器、分光器、干涉仪的精确制备提供了一种新的方法。2011年Liu等<sup>[48]</sup>利用飞秒激光直写技术在掺钕钨酸钪[Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,简称Nd:KGW]晶体中制备了波导,并通过优化扫描速度、脉冲能量等参数获得了低损耗的近场模式分布对称的波导。2011年Liu等<sup>[49]</sup>对损耗仅为0.2 dB/cm、近场模式分布

对称性良好的光波导进行了微区荧光谱和微区拉曼光谱的测试,他们发现Nd:KGW良好的荧光性质和拉曼性质在波导芯中都得到了完好的保留,这为其在波导激光器和自激发拉曼波导激光器中的应用提供了良好的条件,波导结构如图5所示。

2018年Li等<sup>[50]</sup>将飞秒激光的焦点聚焦于无芯光纤的纤芯,利用飞秒激光直写技术在SMF-NCF-SMF(single mode fiber-no core fiber-single mode fiber)结构中刻写了波导,如图6所示,并将其用于温度传感,该传感器在600℃的高温环境下,灵敏度可达-278.86 pm/℃,在高温监控中应用潜力巨大。

## 2.3 飞秒激光直写光栅

在飞秒激光直写光栅技术出现之前,光纤光栅一般是利用相位掩模板制备而成的,该类工艺复杂、成本偏高,且温度稳定性不好。飞秒激光直写技术的诞生为解决这一问题提供了重要手段。利用飞秒激光的超高功率峰值可以在无需敏化的普通单模光纤中直接刻写光纤光栅。飞秒激光聚焦照射到光纤材料时会发生一系列非线性物理变化,对光纤被照射区域进行缺陷型或者损伤型折射率调制,从

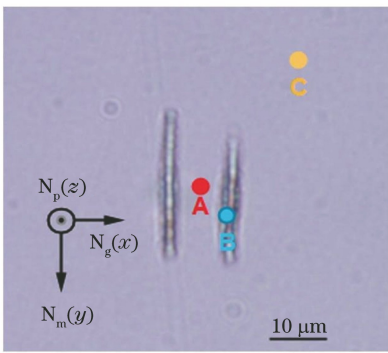


图 5 Nd:KGW 中制备的光波导横截面图<sup>[49]</sup>。A 为波导区域, B 为飞秒激光作用后形成的细丝, C 为样品中远离飞秒激光辐照区域

Fig. 5 Cross section of optical waveguide fabricated in Nd:KGW<sup>[49]</sup>. A is the waveguide area, B is the filament induced by the femtosecond laser, and C is the unprocessed area (bulk) far away from the filament

而形成光栅结构。飞秒激光的脉冲宽度较短,而且功率峰值非常高,因此可以直接对普通单模光纤进行折射率调制,不需要进行光敏处理,而且所制备的光栅温度稳定性好。飞秒激光直写光栅时,通常先将聚焦激光沿光纤轴向扫描,诱导内部产生折射率调制,曝光移动一段距离,遮挡激光再移动相同距离,重复该过程,完成光纤内部的周期性折射率改变。该方法可以灵活地设计光栅的各

种参数,无论是 FBGs (fiber Bragg gratings) 还是 LPFBGs (long period fiber Bragg gratings),均无需对光纤进行载氢等光敏预处理。但该方法要求三维移动平台具有极高的精度,是实验室内研究光栅的有力手段。

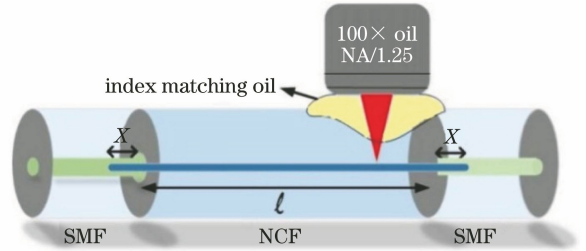


图 6 飞秒激光在 SMF-NCF-SMF 结构上直写波导<sup>[50]</sup>

Fig. 6 Femtosecond laser inscription of optical waveguide in SMF-NCF-SMF<sup>[50]</sup>

2013 年 Liu 等<sup>[51]</sup>搭建了如图 7 所示的装置,利用飞秒激光脉冲刻写了超长周期光纤光栅,光纤结构如图 8 所示。飞秒激光制备的 ULPFBGs (ultra-long period fiber Bragg gratings) 可在更高的温度下正常工作,该光栅也可用于高温测量;不同的共振峰对温度和折射率有着不同的敏感度,因此可同时用于高温和折射率的测量。实验结果表明,飞秒激光制备的基于 ULPFBGs 的光纤传感器在石油工业应用方面潜力巨大。

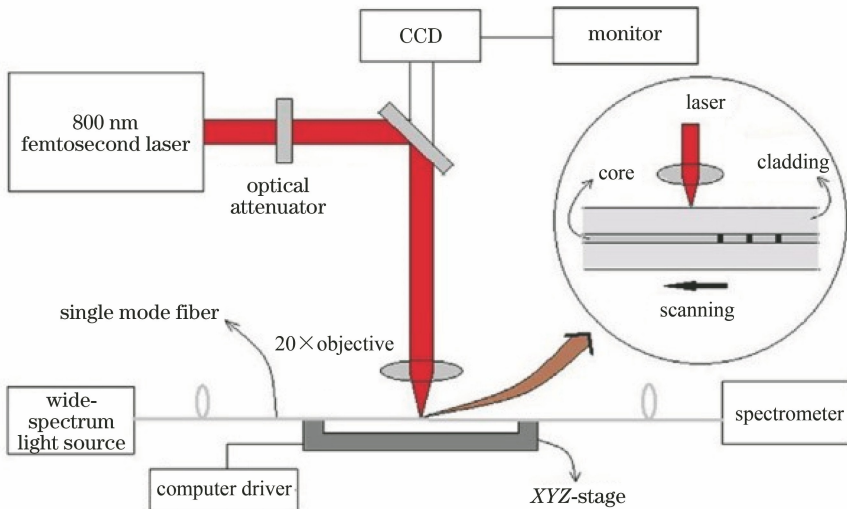


图 7 超长周期光纤光栅的制备装置<sup>[51]</sup>

Fig. 7 Experimental setup for fabrication of ULPFBGs<sup>[51]</sup>

2018 年 Xu 等<sup>[38]</sup>提出并演示了制备蓝宝石晶体光纤布拉格光栅(SFBG)的激光逐行扫描技术,通过优化制造参数获得了反射率为 6.3% 的 SFBG (图 9),成功构建了由 5 个不同波长 SFBG 组成的串行阵列,并测试了这些 SFBG 的高温响应。实验结果

表明,SFBG 可以承受 1612 °C 的高温,而且其在高温区域的敏感度可达 36.5 pm/°C。此类 SFBG 可应用于航空发动机中的温度传感器。之后, Liu 等<sup>[41]</sup>利用飞秒激光逐点扫描技术制作了低损耗的 FBG,其在短波长区域嵌入损耗较小。

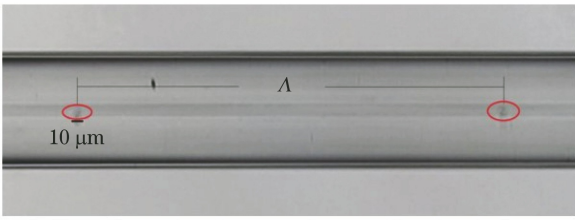


图 8 在光纤纤芯制作的光栅结构<sup>[51]</sup>

Fig. 8 Fabricated grating structure in the core of fiber<sup>[51]</sup>

2019 年 Guo 等<sup>[6]</sup>利用飞秒激光逐行扫描法制备了蓝宝石光纤布拉格光栅,如图 10 所示,在单晶中获得三阶光纤布拉格光栅。与 SFBG 逐点方法编写相比,SFBG 逐行扫描法可获得较高的反射率,光栅宽度约为 40  $\mu\text{m}$ ,如图 11 所示,反射率为 15%,可以实现从 1000~1600  $^{\circ}\text{C}$  的高温传感,温度灵敏度为 34.96  $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ ,在高辐射、高温等恶劣环境探测中有着巨大的潜在应用价值。

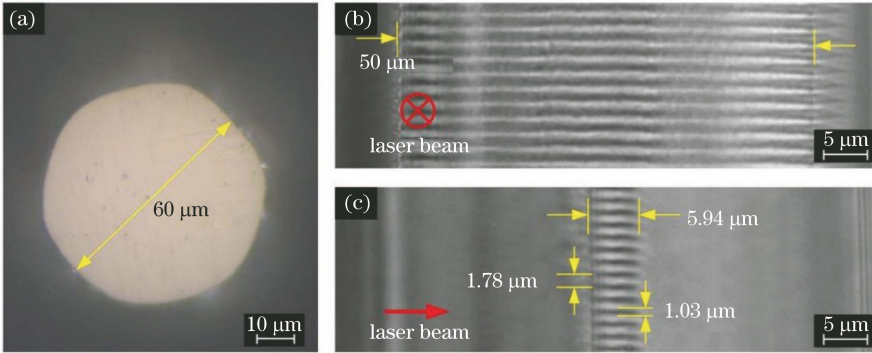


图 9 蓝宝石光纤的横截面和内接四阶 SFBG 的显微镜图像<sup>[38]</sup>。(a)直径为 60  $\mu\text{m}$  的蓝宝石光纤的横截面;内接四阶 SFBG 的显微镜图像:(b)俯视图和(c)侧视图

Fig. 9 Microscope images of cross section of sapphire fiber and inscribed fourth-order SFBG<sup>[38]</sup>. (a) Microscope image of cross section of sapphire fiber with diameter of 60  $\mu\text{m}$ ; microscope images of inscribed fourth-order SFBG: (b) top view and (c) side view

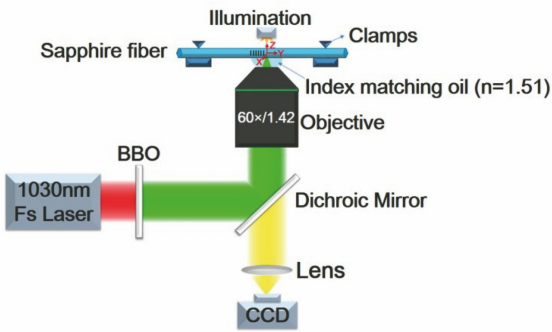


图 10 逐行扫描法示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of line-by-line scanning method<sup>[6]</sup>

### 2.4 飞秒激光直写光纤法布里-珀罗干涉仪

传统自由空间法布里-珀罗(FP)干涉仪通常由两块表面都具有高反射率的平行玻璃镜片组成,光束在两个镜面之间多次反射,形成干涉。与传统的空间 FP 干涉仪相比,全光纤结构的 FP 干涉仪尺寸更小、结构紧凑、制备简便。采用飞秒激光直写技术可以直接在光纤内部实现 FP 干涉仪的制作,效率更高,长度更易控制,其在光纤激光器设计和光纤传感探头设计等方面应用潜力巨大。

2019 年 Deng 等<sup>[52]</sup>利用飞秒激光直写技术,在无芯光纤中制备了光波导,然后在其内部设计制备了级联的 FP 腔,结构如图 12 所示。该结构在

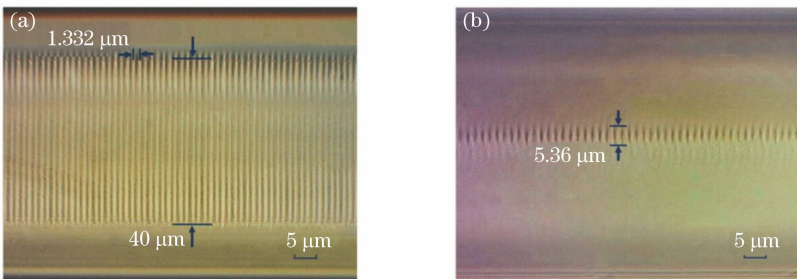


图 11 SFBG 结构图<sup>[6]</sup>。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 11 Photomicrographs of fabricated SFBG<sup>[6]</sup>. (a) Top view; (b) side view



1100 °C下具有良好的高温稳定性,用于高温传感器时性能优越,在100~400 °C温度范围内的温度灵敏度可达9.91  $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ,在400~1100 °C温度范围内的温度灵敏度可达15.88  $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。该传感器体积小、制作简单、操作方便,便于监控在极端高温环境中温度的变化。同年年底,Wang等<sup>[53]</sup>使用同种方法在刻写的波导中设计了多级级联的FP干涉结构,用于高温测量,在400~1100 °C温度范围内,灵敏度可达16.36  $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。

飞秒激光直写技术具有加工效率高、加工精度高、热效应影响小等优点,在微纳器件加工领域应用潜力巨大。此外,在目前研究的基础上,还应进一步深入研究飞秒激光对透明材料的微加工原理,优化飞秒激光直写技术的工艺和参数,设计并制备出性能更加优异的微纳器件。

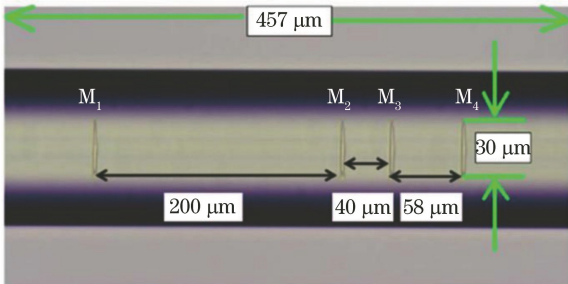


图12 光纤内部的4个反射镜面<sup>[52]</sup>

Fig. 12 Four in-fiber mirrors<sup>[52]</sup>

### 3 光纤功能器件的飞秒激光双光子聚合制备

#### 3.1 飞秒激光双光子聚合原理

双光子聚合是在强光作用下材料同时吸收两个光子而引发的聚合过程。在很强的激发功率下,光子通量密度较高,在此条件下比较容易发生双光子吸收现象。而飞秒脉冲激光在很低的平均功率下具有较大的脉冲能量,因此聚焦后的飞秒脉冲激光与材料相互作用时,也很容易引发物质的双光子吸收。

双光子聚合材料种类较多,根据其应用范畴选

择不同的聚合材料,典型材料如蛋白质、SCR500<sup>[3]</sup>、SU-8光刻胶<sup>[7]</sup>等。这些聚合物材料主要是由光引发剂和聚合物单体组成。在强激光作用下聚合物材料中的光引发剂同时吸收两个光子使其从基态跃迁到激发态,当激发态的能量大于断裂键的能量时产生聚合所需的活性基团,活性基团催化聚合物单体产生链式反应,实现聚合。通过控制激光焦点在聚合物材料中的扫描,使得曝光处的聚合物单体交联为固体,而未曝光的聚合物溶于有机溶剂,方便清洗去除。因此,该方法可以实现复杂三维微结构的制备。

在不同领域中,集成器件对聚合物结构的形状和尺寸有着不同的要求,高分辨的结构是实现器件高度集成的必备条件。飞秒激光双光子聚合技术具有明显的阈值性,只有激光能量高于阈值的位置才能发生聚合反应。由于脉冲激光的强度在空间上呈高斯分布,即焦斑中心部分光强最大,越往外强度越小,所以聚合物材料只有在激光中心位置才能发生聚合,而聚合物材料的其他部分几乎不受影响,双光子聚合引发的光化学反应被局限在焦点周围极小的范围内。

双光子聚合技术制备微结构的分辨率主要与激光的平均功率和曝光时间有关。其中,激光平均功率的大小直接影响微结构的特征尺寸,而曝光时间影响聚合物材料的光聚合阈值,因此,通过精确控制激光的平均功率和曝光时间可以使双光子聚合技术制备微结构的分辨率突破光学衍射极限。双光子聚合过程发生所需的阈值依赖于聚合物材料中活性基团的浓度,活性基团的浓度与光引发剂的初始浓度和曝光时间相关。因此可以通过增加聚合材料的曝光时间来降低聚合所需的阈值条件,提高微结构的分辨率和精度。

早在20世纪30年代,Kaiser等<sup>[54]</sup>已经预测了双光子吸收效应的存在。Kawata等<sup>[1,55]</sup>成功制作了“纳米牛”(图13),标志着双光子聚合技术已经基本可以完成复杂的微纳三维结构设计与制备。

“纳米牛”的尺寸基本与单个红细胞的尺寸类似,可以通过人体内最小尺寸的血管。双光子聚合

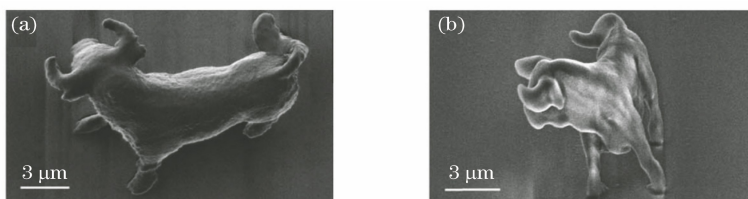


图13 不同扫描方式下相同的微观结构<sup>[55]</sup>。(a)光栅模式;(b)矢量模式

Fig. 13 Same micro-structures made by different scanning methods<sup>[55]</sup>. (a) Raster mode; (b) vector mode

技术在医学、药学等领域应用潜力巨大。除此之外,由于双光子聚合材料具有很好的生物兼容性,因此采用双光子聚合技术制备的微结构在生物医疗领域中有着重要的意义和价值。2002年 Tanaka 等<sup>[3]</sup>利用双光子聚合技术在实验室中制备了三维螺旋微结构。

飞秒激光双光子聚合技术制备的高分辨率微结构为器件微型化发展提供了基础,在航空航天、生物医学、环境监测和军事等领域有着广阔的应用前景。

### 3.2 飞秒激光聚合制备光纤干涉仪

光纤干涉仪具有尺寸小、质量轻、抗电磁干扰、一体性强等特点,在光通信、信息处理和传感中已被广泛使用。三维聚合物光学元件在高度集成的光子器件中有着重要的应用价值。利用双光子聚合技术在光纤末端面制备聚合物微结构可实现对输出光场的有效调制<sup>[32]</sup>,该类光纤结构可以有效避免光电转换系统复杂的连接线等问题;飞秒激光聚合制备的光纤温度传感结构<sup>[33]</sup>可突破光纤材料本身对温度不敏感的限制,利用聚合物材料对温度的高敏感性可将其灵敏度提高若干个数量级,并且可实现对多个参数的同时测量,还具有很好的耐酸、耐碱和机械稳定性,可以在恶劣的环境中使用。

2018年 Liu 等<sup>[32]</sup>成功搭建了飞秒激光双光子聚合微加工装置,将 SU-8 聚合物波导集成到光纤微腔中,制备了一个透射式的 MZ (Mach-Zehnder) 光纤传感结构,如图 14 所示。实验结果表明,25~65 °C 温度范围内的温度灵敏度达到了 447 pm/°C。此外,SU-8 光刻胶具有很好的生物兼容性,因此制备的 MZ 光纤温度传感结构在生物医疗、环境工程等领域都将有着重要的应用价值。

此后,Li 等<sup>[33]</sup>利用飞秒激光双光子聚合技术制备了一个反射式、具有超高温度的液腔 FP 光纤传感结构,如图 15 所示,FP 腔沿光纤轴向的总长度只有 20 μm。由于液态光刻胶材料对温度非常敏感,所以超小体积密封液体腔 FP 光纤传感结构的温度灵敏度达到了 877 pm/°C,与传统的反射式光纤温度传感结构相比,其灵敏度提高了近一个量级。

2015年 Li 等<sup>[56]</sup>利用飞秒激光双光子聚合技术制备了一个反射式的开腔三光束 FP 光纤折射率传感结构。基于三光束开腔 FP 干涉理论,开腔 FP 光纤传感结构在用于液体折射率测量时,待测液体可以填充到开腔内直接影响反射光的光程,从而使得开腔 FP 光纤传感结构的折射率灵敏度显著提高。在折射率测量中,由于温度会影响液体折射率的大小,通过对干涉谱中的两个干涉峰的温度和折射率

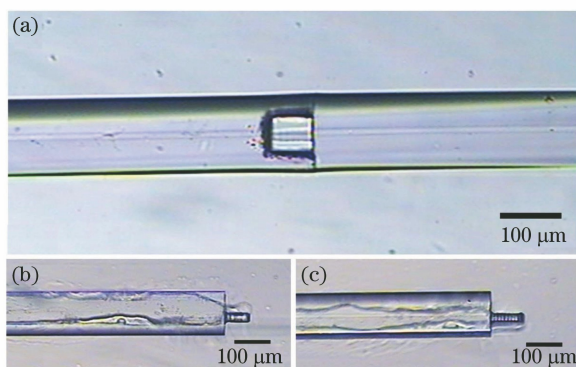


图 14 微腔内聚合物波导结构<sup>[32]</sup>。(a)微腔内聚合物波导的俯视图;(b)聚合物波导的长度为 60 μm;(c)聚合物波导长度为 80 μm

Fig. 14 Polymer waveguide integrated in the fibre micro-cavity<sup>[32]</sup>. (a) Top view of fabricated polymer waveguide integrated in fiber micro-cavity; (b) polymer waveguide with length of 60 μm; (c) polymer waveguide with length of 80 μm

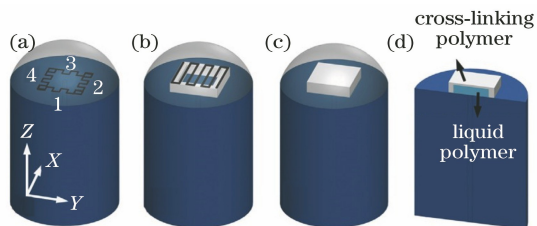


图 15 液腔 FP 光纤传感结构制备过程<sup>[33]</sup>

Fig. 15 Fabrication process diagram of liquid polymer filled-cavity FP fiber sensing structure<sup>[33]</sup>

特性进行监测,并采用传感矩阵的方法实现了折射率和温度的同步传感,有效地提高了液体折射率的测量准确度。2017年 Li 等<sup>[57]</sup>利用飞秒激光双光子聚合技术制备了 FP 光纤传感结构,将其应用于声波传感特性测试,结果表明,所制备的具有双侧壁和悬空薄膜的 FP 结构在 1 kHz 的声波下,灵敏度达到了 1 V/Pa,且在 0~1.1 kPa 的声压范围内具有良好的线性度,线性度为 94.814%。由于 SU-8 光刻胶具有很好的生物兼容性,因此该双侧壁和悬空薄膜 FP 光纤声波传感结构在生物医疗等领域也有着巨大的应用潜力。

### 3.3 飞秒激光聚合制备光纤光栅

光纤光栅在滤波器、波分复用器、光纤激光器以及一些光纤传感器中应用广泛。飞秒激光聚合制备光纤光栅时周期更容易调控、质轻柔软、具有优异的拉伸性能和较高的温度灵敏度,更加适合一些传感类的应用,聚合物光纤光栅的制备与应用成为近年来光学领域的研究热点。2018年 Wang 等<sup>[58]</sup>使用



飞秒激光直接照射单模光纤表面聚合物,形成布拉格光栅波导(BWG),用来进行折射率测量,如图16所示。2017年,Lin等<sup>[59]</sup>提出了一种利用双光子聚合在光敏树脂中制作布拉格光栅的方法。这种聚合形成的光栅位于拉锥光纤的锥区,能够有效防止光纤损坏或者变形。通过优化激光强度,可改善输出的光谱特性,进行折射率测量,这项工作为光学结构集成开辟了新思路。

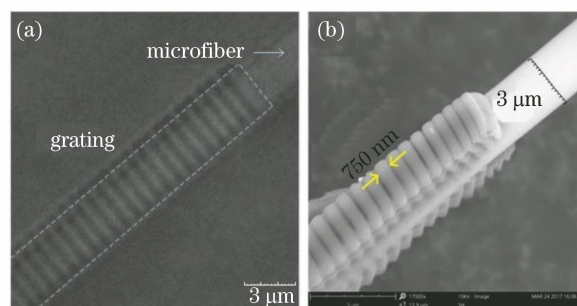


图6 聚合物光栅光学显微镜图像<sup>[58]</sup>。(a)清洗前;(b)清洗后

Fig. 16 Optical microscope images of polymerized grating<sup>[58]</sup>. (a) Before rinsing; (b) after rinsing

2018年Li等<sup>[60]</sup>利用飞秒激光诱导多光子聚合技术制备了新型悬浮的光纤布拉格光栅,这种全光纤聚合物布拉格光栅具有很高的温度敏感性、优异的机械强度和超高集成度。温度测量范围为24~40℃,这种温度感测元件将是生物温度测量的良好工具。

## 4 飞秒激光诱导水击穿

### 4.1 飞秒激光诱导水击穿原理

当较大脉冲能量的飞秒激光聚焦到水中时,飞秒激光脉冲会诱导水产生光学击穿现象<sup>[61-63]</sup>,水分子会被飞秒激光脉冲电离,产生具有高温高压的等离子体,在水中迅速绝热膨胀,其内能向水中传递,在水中产生冲击波和激光空泡<sup>[64-65]</sup>。使用飞秒激光诱导水击穿方法对玻璃等透明材料进行加工时,产生的冲击波和激光空泡作用在玻璃材料上,高速高压的冲击波和激光空泡溃灭时释放出的高速水射流对玻璃材料产生刻蚀,刻蚀掉的玻璃材料会变成粉末并悬浮在水中。当飞秒激光对玻璃材料由外到内按照设计扫描路线逐渐刻蚀时,能在玻璃材料内制备出复杂的微通道和微腔结构,同时,刻蚀掉的粉末会随着水流沿着微通道不断向玻璃材料外部排出。2001年Li等<sup>[66]</sup>采用飞秒激光诱导水击穿微加工技术在玻璃内由下向上制备出直径约为4μm的均匀微孔,其深度可达0.15mm。此后,又在不同玻璃中

制备出了不同尺寸的微通道结构<sup>[67-69]</sup>。2009年Li等<sup>[70]</sup>利用飞秒激光脉冲水辅助在玻璃中制备三维微流体通道,在相同的扫描速度下,随着激光功率的增大,通道截面形状由椭圆变为圆形,制备了两层直径约为8μm的微通道,两层微通道之间的距离约为20μm,通道内壁光滑。

### 4.2 飞秒激光诱导水击穿加工微通道

2010年Li等<sup>[8]</sup>采用飞秒激光直写技术在玻璃中制备了长螺旋形微流体通道。经过氢氟酸蚀刻和烘烤后,玻璃中的激光改性区域形成中空的微观结构,螺距和圆的直径分别为1000μm和500μm,总长度为3000μm,如图17所示。通道的直径尺寸和螺距可自由设置。图18为不同时间蓝色溶液流过该螺旋微通道的侧视图。实验结果表明,氢氟酸对微通道内表面的腐蚀作用使微通道的内表面发生变化,烘烤后更光滑。该技术在三维微流控组件制造领域应用潜力巨大。

2011年Li等<sup>[71]</sup>在之前研究的基础上,采用飞秒激光诱导蒸馏水击穿技术,利用其产生的高速射流和冲击波对石英玻璃进行加工,在石英玻璃上制备了直径均匀的复杂螺旋微通道阵列,如图19所示。螺旋微通道阵列的分布、线圈数、线圈直径和螺距均可控制,并成功制造了螺旋微通道阵列,其螺旋状微通道的长度为1mm,螺旋微槽的直径为50μm。该研究成果为加工复杂微细三维材料通道和多层微流体元件提供了一种新的方法。

此后,Li等<sup>[72]</sup>采用水辅助飞秒激光的方法制造了一个微分流和微混合器,将蒸馏水引入制备的微通道中,大大降低了废料阻塞的影响。微流体的总长度为6mm,无任何变形。所制微通道的直径可以通过改变使用激光的脉冲能量和扫描区域的宽度来控制,如图20所示。这种微流体通道的制备方法不需要其他的感光手段和后期处理。

2013年Li等<sup>[73]</sup>将飞秒激光诱导水击穿方法应用于刻蚀石英玻璃,所产生的高速射流和冲击波用于制作三维微流控芯片,如图21所示,可同时进行多通道的流体反应与混合,具有较高的设计灵活性和制造可行性,能够有效增加微通道的长度和微通道的复杂性。实验结果表明,微通道的直径均匀证明了水辅助飞秒激光烧蚀制造工艺的可行性。预计这项技术可应用于透明材料制作多层微流控芯片。

2013年Liu等<sup>[74]</sup>搭建了如图22所示的利用飞秒激光诱导水击穿在光纤中制作微通道的实验装置,在光纤内部制备了三级液体折射率传感探头,如

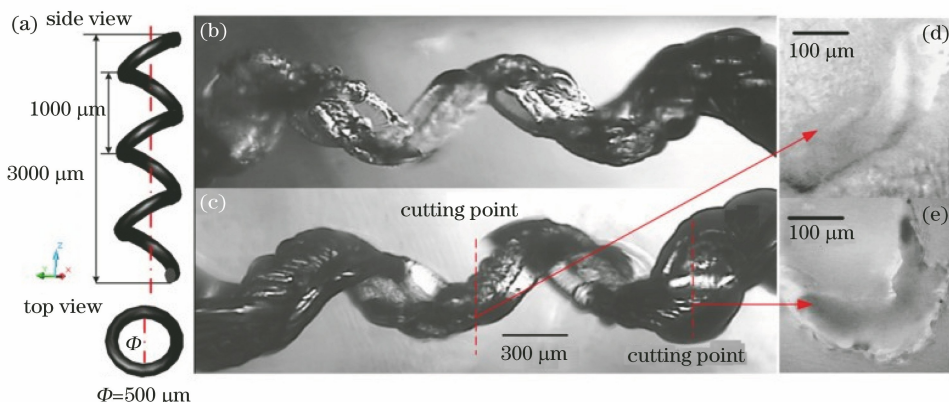


图 17 玻璃中螺旋通道的微观结构<sup>[8]</sup>。(a)螺旋形微通道示意图；(b)玻璃内部 HF 酸蚀刻的螺旋形微通道的侧面图；(c)蚀刻样品在 600 °C 烘烤 4 h 后螺旋状微通道的侧视图；(d)热处理后微通道的横截面；(e)通道开口处的横截面

Fig. 17 Microstructure of spiral channels in glass<sup>[8]</sup>. (a) Diagram of spiral-shaped microchannel; (b) side view of etched spiral-shaped microchannel by HF acid inside glass; (c) side view of spiral-shaped microchannel after baking of etched sample at 600 °C for 4 h; (d) cross-section of post baked microchannel; (e) cross-section of channel at the opening area

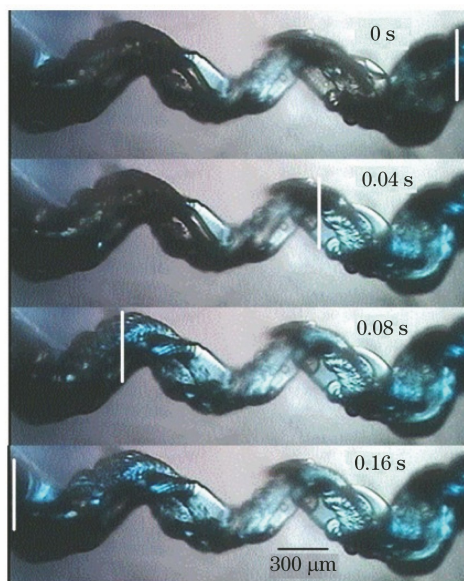


图 18 蓝色溶液流经螺旋微通道的侧视图<sup>[8]</sup>

Fig. 18 Side view of blue solution flowing through spiral-microchannel<sup>[8]</sup>

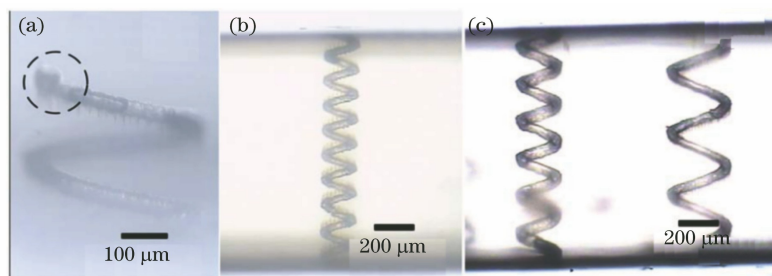


图 19 在石英玻璃上制备的复杂螺旋通道<sup>[71]</sup>。(a)末端有块的螺旋微通道；(b)(c)长度为 1 mm 的螺旋微通道

Fig. 19 Helical microchannel in quartz glass<sup>[71]</sup>. (a) Fabricated helical microchannel with block at end of channel; (b)(c) fabricated helical micro channels with length of 1 mm

图 23 所示。微通道间距为 300 μm, 传感器结构长度为 600 μm, 该传感器更适用于精确测量。每个微通道的直径均匀, 约 10 μm, 略大于纤芯直径 8.3 μm, 每个微通道的长度为 125 μm, 与光纤包层的直径相同。所有的微通道正好穿过纤芯, 液体可以从顶部的开口直接进入微通道底部。该液体折射率传感器探头容易制作, 具有更小的尺寸和更好的机械性能。

当该传感探头用于折射率测量时, 在 1.333 ~ 1.383 折射率范围内, 波长偏移的折射率灵敏度和损耗变化的灵敏度分别达到了 -2406.1 nm/RIU 和 -156.8 dB/RIU, 并且该传感结构的温度串扰较小。由于该传感器对液体折射率有着较高的灵敏度, 因此可用于监测部分液体中成分的变化并且不受温度干扰, 还可以用于生物医学、环境监测等领域, 特别是在水污染监测中有着较大的应用潜力。

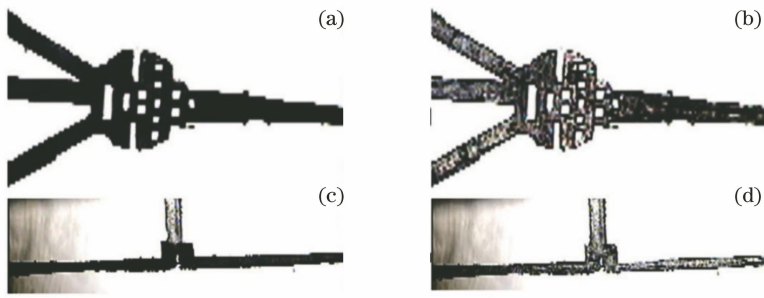


图 20 微分流和微混合器结构<sup>[72]</sup>。(a)空的微混合器;(b)装满水的微型混合器;(c)空的微型分流器;(d)装有水的微型分流器  
Fig. 20 Structures of micro diverter and micro mixer<sup>[72]</sup>. (a) Empty micro mixer; (b) micro mixer filled with water; (c) empty micro diverter; (d) micro diverter filled with water

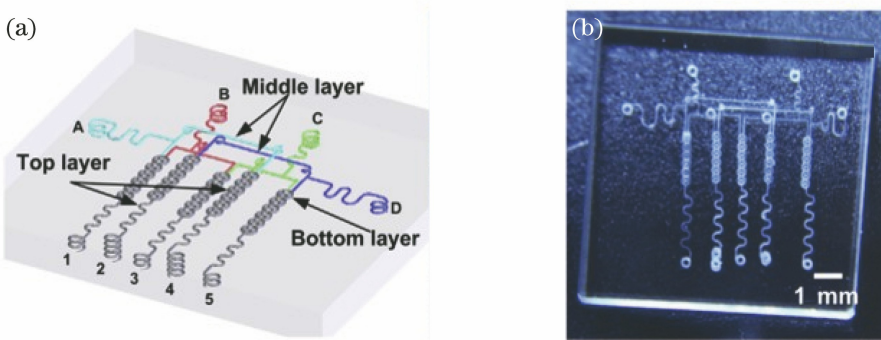


图 21 三维微流控芯片<sup>[73]</sup>。(a)微流控芯片示意图;(b)硅玻璃中制备的微流控芯片  
Fig. 21 Three-dimensional microfluidic chip<sup>[73]</sup>. (a) Diagram of microfluidic chip; (b) fabricated microfluidic chip in silica glass

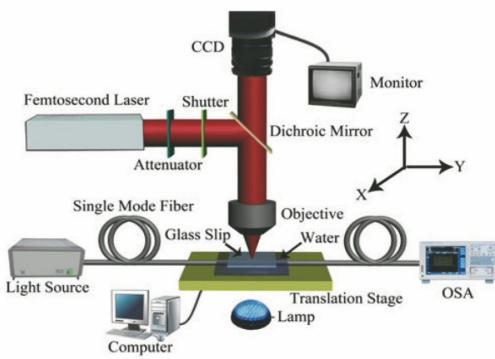


图 22 利用飞秒激光诱导水击穿在光纤中制备微通道<sup>[74]</sup>  
Fig. 22 Fabricate micro channels in optic fibers using femtosecond laser-induced water break down<sup>[74]</sup>

### 4.3 飞秒激光水辅助加工光纤干涉仪

除了上述微通道的制备之外,飞秒激光水辅助法加工干涉微腔技术也成为制备光纤功能器件的主流方法。2013年 Liu 等<sup>[75]</sup>使用飞秒激光诱导水击穿的方法在普通单模光纤的末端制作了单个微通道高温光纤传感器,然后利用微电弧放电进行退火,使得通道内壁平滑。微通道的两侧和端面光纤的三个反射面形成了三光束 FP 干涉。在 200~1000 °C 的温度范围内,该方法灵敏度可达 12.74 pm/°C,拟合

线性度可达 99.6%,体积小,机械性能好,可用于恶劣环境下的高温测量。2014年 Liu 等<sup>[76]</sup>在之前研究的基础上,使用同种方法在单模光纤上制备了 H 型的湿度传感器,其传感探头基本结构如图 24 所示,灵敏度高达 -1.00 dB/1%RH。制成的 H 型微通道光纤传感器灵敏度高、响应快、成本低。

除了上述的 FP 干涉型传感器之外,Liu 等<sup>[77]</sup>还利用飞秒激光水辅助法加工制备了 MZ 干涉型传感器;2017年 Liu 等<sup>[78]</sup>利用飞秒激光诱导的水击穿技术在 SMS(single mode fiber-multi mode fiber-single mode fiber)的光纤结构中制备了具有两个对称开口的微腔,开口尺寸为 10 μm×100 μm,腔内结构平滑,结构如图 25 所示。

微腔恰好跨过一半光纤芯的直径,与另一半构成了 MZ 干涉仪的两个臂,制备了高品质光纤内 MZ 干涉腔,用于液体折射率测量。光纤内 MZ 干涉腔具有超高折射率灵敏度(14296.98 nm/RIU),可用作超灵敏液体折光仪,分辨率可达 1×10<sup>-5</sup> RIU,线性度为 99.62%,温度串扰较低,只有 0.04 nm/°C。

目前,飞秒激光诱导水击穿加工技术已经相对成熟,可以在多种材料中制备出各种形状的三维通



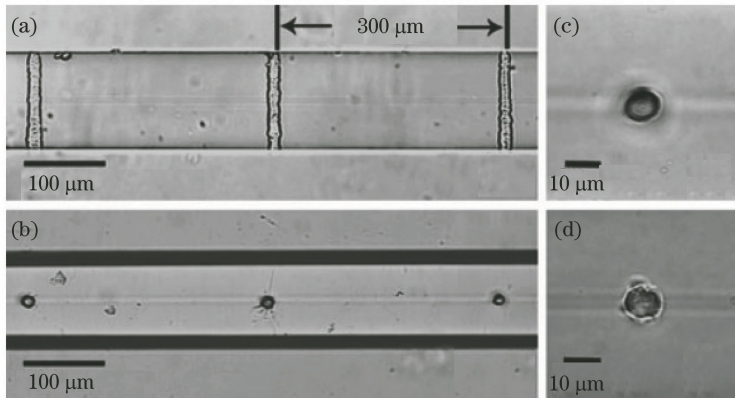


图 23 具有穿过光纤纤芯的三个微通道的液体折射率传感器的结构图<sup>[72]</sup>。(a)正视图；(b)俯视图；(c)光纤顶部的微通道的开口；(d)光纤底部的微通道的开口

Fig. 23 Structures of liquid refractive index sensor with three micro channels across fiber core<sup>[72]</sup>. (a) Front view; (b) top view; (c) opening of microchannel on the top of fiber; (d) opening of microchannel on the bottom of fiber

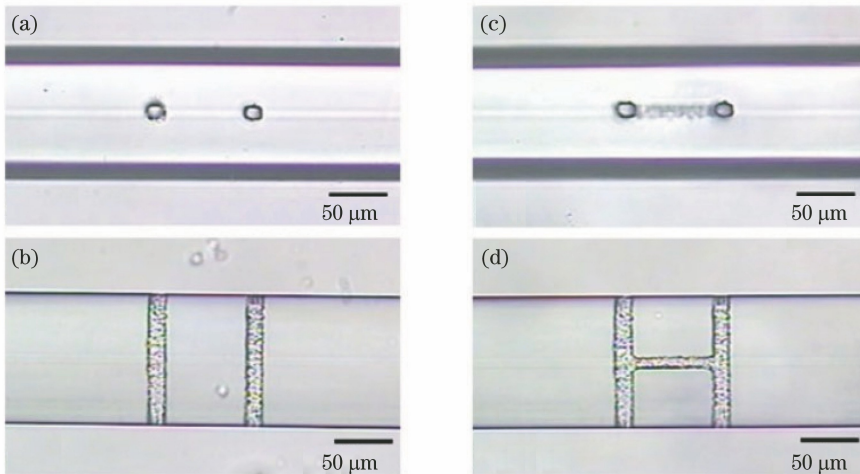


图 24 在单模光纤上制备的 H 型湿度传感器结构<sup>[76]</sup>。(a)两个垂直微通道正好穿过纤芯的俯视图；(b)在第一步中制作的两个垂直微通道正好穿过 SMF 光纤芯的侧视图；(c) SMF 中 H 型微通道的俯视图；(d) SMF 中 H 型微通道的侧视图

Fig. 24 H-type humidity sensor in SMF<sup>[76]</sup>. (a) Top view of fabricated two vertical micro channels rightly across fiber core; (b) side view of fabricated two vertical micro channels rightly across fiber core in SMF in the first step; (c) top view of fabricated H-type microchannel in SMF; (d) side view of fabricated H-type microchannel in SMF

道和微腔结构,并可应用于传感、生物医学等领域。在目前研究的基础上,研究人员应深入研究飞秒激光诱导水击穿制备机理,优化制备工艺与参数,设计和制备实用性更强的微纳器件,将具有市场前景的实验室成果转化为实际产品,进而推向市场。

## 5 结 论

从“纳米牛”到各种三维微纳结构,再到纳米机器人以及各种光纤光栅、光纤传感器、微流体芯片等,飞秒激光加工技术逐渐实现了从机理研究过渡到应用研究,在生物医学、海洋探测、化工等多个领域应用广泛。如果将飞秒激光制备出的光纤功能器

件嵌入微流体芯片和微结构中,不仅可以将光纤功能器件作为一个功能型光学元件服务于微全分析系统,而且可以作为传感监测核心器件用于微全分析信息采集,如可以利用光纤传感器进行微流体温度、折射率、特定成分检测等,能够提供极高的检测灵敏度和极低的检测极限。将飞秒激光微纳加工技术、光纤传感技术与微流体芯片技术相结合能够拓宽微流体芯片系统的应用领域,使其不再局限于样品分离、检测等单一功能,而成为真正的集成样品引入、混合、分离、检测等功能的微全分析系统。此外,还应探索更多可以用于微纳加工的可降解、生物相容性较强的材料,优化制备参数,改进并完善器件性

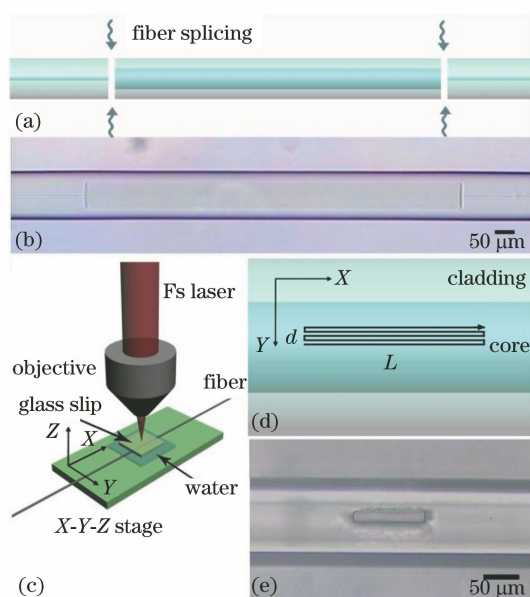


图 25 利用飞秒激光诱导的水击穿技术在 SMS 光纤结构中制备 MZ 干涉型微腔<sup>[78]</sup>。(a)将一段多模光纤拼接在两段 SMF 之间;(b) SMS 结构;(c)飞秒激光诱导水击穿法制造 SMS 微腔的装置;(d)激光聚焦的扫描轨迹;(e) SMS 中制作的微腔

Fig. 25 MZ interferometer microcavity in SMS fiber structure by femtosecond laser-induced water breakdown<sup>[78]</sup>. (a) A section of multi mode fiber was spliced between two sections of the SMF; (b) structure of SMS; (c) setup for fabricating microcavity in SMS by femtosecond laser-induced water breakdown; (d) scanning track of laser focus; (e) fabricated microcavity in SMS

能,推动飞秒激光加工技术更快速的发展。

### 参 考 文 献

[1] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices [J]. *Nature*, 2001, 412 (6848): 697-698.

[2] Serbin J, Egbert A, Ostendorf A, et al. Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 301-303.

[3] Tanaka T, Sun H B, Kawata S. Rapid sub-diffraction-limit laser micro/nanoprocessing in a threshold material system [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(2): 312-314.

[4] Teng Y, Zhou J J, Lin G, et al. Recent research progress on femtosecond laser induced

microstructures in glasses [J]. *International Journal of Optomechanics*, 2012, 6(2): 179-187.

- [5] Li Q K, Yu Y H, Wang L, et al. Sapphire-based Fresnel zone plate fabricated by femtosecond laser direct writing and wet etching [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(12): 1290-1293.
- [6] Guo Q, Yu Y S, Zheng Z M, et al. Femtosecond laser inscribed sapphire fiber Bragg grating for high temperature and strain sensing [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2019, 18: 208-211.
- [7] Deubel M, von Freymann G, Wegener M, et al. Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(7): 444-447.
- [8] Li Y, Qu S L. Fabrication of spiral-shaped microfluidic channels in glass by femtosecond laser [J]. *Materials Letters*, 2010, 64(13): 1427-1429.
- [9] Luo F F, Lin G, Sun H Y, et al. Generation of bubbles in glass by a femtosecond laser [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(19): 4592-4595.
- [10] Cheng Y, Sugioka K, Midorikawa K, et al. Control of the cross-sectional shape of a hollow microchannel embedded in photostructurable glass by use of a femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(1): 55-57.
- [11] Kamlage G, Chichkov B N, Ostendorf A, et al. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4760: 394-397.
- [12] Rao Y J, Deng M, Duan D W, et al. Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15 (21): 14123-14128.
- [13] Nakaya T, Qiu J R, Zhou C H, et al. Fabrication of Damman gratings inside glasses by a femtosecond laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21 (6): 1061-1063.
- [14] Quante K, Ludwig K, Kern M. Marginal and internal fit of metal-ceramic crowns fabricated with a new laser melting technology [J]. *Dental Materials*, 2008, 24(10): 1311-1315.
- [15] Torchia G, Rodenas A, Benayas A, et al. Highly efficient laser action in femtosecond-written Nd : yttrium aluminum garnet ceramic waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(11): 111103.
- [16] Ran Z L, Liu S, Liu Q, et al. Laser-machined microcavities for simultaneous measurement of high-temperature and high-pressure [J]. *Sensors*, 2014,

- 14(8): 14330-14338.
- [17] Wang P F, Zhao H Y, Brambilla G, et al. Long period grating inscribed in multimode fibre interferometer and its application in refractive index sensing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 96346A.
- [18] Liu Z, Liu Y X, Tang Y, et al. Fabrication and application of a non-contact double-tapered optical fiber tweezers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22480-22489.
- [19] Subramanian K, Gabay I, Ferhanoglu O, et al. Kagome fiber based ultrafast laser microsurgery probe delivering micro-Joule pulse energies [J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, 7(11): 4639-4653.
- [20] Nishimura N, Schaffer C B, Friedman B, et al. Targeted insult to subsurface cortical blood vessels using ultrashort laser pulses: three models of stroke [J]. *Nature Methods*, 2006, 3(2): 99-108.
- [21] Xu H L, Cheng Y, Chin S L, et al. Femtosecond laser ionization and fragmentation of molecules for environmental sensing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(3): 275-293.
- [22] Guan C Y, Tian X Z, Li S Q, et al. Long period fiber grating and high sensitivity refractive index sensor based on hollow eccentric optical fiber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 188: 768-771.
- [23] Chen Q Q, Fang Z J, Song H, et al. Femtosecond laser induced space-selective precipitation of  $\text{Cr}^{3+}$ -doped  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$  crystal in glass [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 699: 243-246.
- [24] Chen Q Q, Song H, Zhang F T, et al. A strategy for fabrication of controllable 3D pattern containing clusters and nanoparticles inside a solid material [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(26): 9083-9088.
- [25] Qiu J R. Formation and applications of periodic structures in transparent materials induced by single fs laser beam [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2013, 8: 03008.
- [26] Zhang F, Yu Y, Cheng C, et al. Wavelength response and thermal stability of embedded nanograting structure light attenuator fabricated by direct femtosecond laser writing [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(1): 53-58.
- [27] Ran Z L, Bao H H, Cook K, et al. Combined regenerated fibre Bragg gratings and Fabry-Perot etalons for dual strain and temperature sensing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 963459.
- [28] Rao Y J, Ran Z L, Liao X, et al. Hybrid LPFG/MEFPI sensor for simultaneous measurement of high-temperature and strain [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 70043H.
- [29] Rao Y J, Ran Z L. Optic fiber sensors fabricated by laser-micromachining [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 808-821.
- [30] Ran Z L, Liu S, Liu Q, et al. Novel high-temperature fiber-optic pressure sensor based on etched PCF F-P interferometer micromachined by a 157-nm laser [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(7): 3955-3958.
- [31] Liu Y, Qu S L. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown for refractive index sensing [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3): 469-474.
- [32] Liu Y, Li M, Zhao P J, et al. High sensitive temperature sensor based on a polymer waveguide integrated in an optical fibre micro-cavity [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(1): 015801.
- [33] Li M, Liu Y, Gao R X, et al. Ultracompact fiber sensor tip based on liquid polymer-filled Fabry-Perot cavity with high temperature sensitivity [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 233: 496-501.
- [34] Cao K J, Liu Y, Qu S L. Compact fiber biocompatible temperature sensor based on a hermetically-sealed liquid-filling structure [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29597-29604.
- [35] Wallace J. Femtosecond laser carves refractive-index-sensing F-P cavity in optical fiber [J]. *Laser Focus World*, 2014, 50(2): 11-20.
- [36] Wallace J. Technology review: top 20 technologies for 2014 cover the range from basic R&D to new apps [J]. *Laser Focus World*, 2014, 50(12): 25-36.
- [37] Mao G P, Sun B, Yuan T T, et al. Fabrication of fiber Bragg gratings in embedded-core hollow optical fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9655: 96552Z.
- [38] Xu X Z, He J, Liao C R, et al. Sapphire fiber Bragg gratings inscribed with a femtosecond laser line-by-line scanning technique [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4562-4565.
- [39] Wang Q H, Wang D, Zhang H. Fiber Bragg grating with a waveguide fabricated in no-core fiber and multimode fiber [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2693-2696.
- [40] Wolf A A, Dostovalov A V, Bronnikov K, et al. Arrays of fiber Bragg gratings selectively inscribed in



- different cores of 7-core spun optical fiber by IR femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13978-13990.
- [41] Liu X Y, Wang Y P, Li Z L, et al. Low short-wavelength loss fiber Bragg gratings inscribed in a small-core fiber by femtosecond laser point-by-point technology[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5121-5124.
- [42] Dai Y, Wu G R, Lin X, et al. Femtosecond laser induced rotated 3D self-organized nanograting in fused silica[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 18072-18078.
- [43] Ma Y C, Wang L, Guan K M, et al. Silicon-based suspended structure fabricated by femtosecond laser direct writing and wet etching[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(15): 1605-1608.
- [44] Liu X Q, Yu L, Chen Q D, et al. Mask-free construction of three-dimensional silicon structures by dry etching assisted gray-scale femtosecond laser direct writing [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(9): 091602.
- [45] Grenier J R, Fernandes L A, Herman P R. Femtosecond laser writing of optical edge filters in fused silica optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4493-4502.
- [46] Pospiech M, Emons M, Steinmann A, et al. Double waveguide couplers produced by simultaneous femtosecond writing [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3555-3563.
- [47] Riesen N, Gross S, Love J D, et al. Femtosecond direct-written integrated mode couplers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29855-29861.
- [48] Liu X, Qu S, Tan Y, et al. Buried channel waveguides in neodymium-doped  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  fabricated by low-repetition-rate femtosecond laser writing[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(1): 145-149.
- [49] Liu X Y, Qu S L, Tan Y, et al. Preservation of fluorescence and Raman gain in the buried channel waveguides in neodymium-doped  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  ( $\text{Nd}:\text{KGW}$ ) by femtosecond laser writing [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(6): 930-934.
- [50] Li W, Wang D. Femtosecond laser inscribed straight waveguide in no-core fiber for in-line Mach-Zehnder interferometer construction [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3405-3408.
- [51] Liu Y, Qu S L. Femtosecond laser pulses induced ultra-long-period fiber gratings for simultaneous measurement of high temperature and refractive index [J]. *Optik*, 2013, 124(12): 1303-1306.
- [52] Deng J, Wang D N. Construction of cascaded Fabry-Perot interferometers by four in-fiber mirrors for high-temperature sensing[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1289-1292.
- [53] Wang Q H, Zhang H, Wang D N. Cascaded multiple Fabry-Perot interferometers fabricated in no-core fiber with a waveguide for high-temperature sensing [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5145-5148.
- [54] Kaiser W, Garrett C G B. Two-photon excitation in  $\text{CaF}_2:\text{Eu}^{2+}$  [J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(6): 229-231.
- [55] Kawata S, Sun H B. Two-photon photopolymerization as a tool for making micro-devices[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 208/209: 153-158.
- [56] Li M, Liu Y, Zhao X L, et al. Miniature-shaped polymer fiber tip for simultaneous measurement of the liquid refractive index and temperature with high sensitivities[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(10): 105701.
- [57] Li M, Liu Y, Zhao X L, et al. High sensitivity fiber acoustic sensor tip working at 1550 nm fabricated by two-photon polymerization technique[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 260: 29-34.
- [58] Wang J, Lin C P, Liao C R, et al. Bragg resonance in microfiber realized by two-photon polymerization [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3732-3737.
- [59] Lin C P, Liao C R, Wang J, et al. Fiber surface Bragg grating waveguide for refractive index measurements [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1684-1687.
- [60] Li C, Liao C R, Wang J, et al. Femtosecond laser microprinting of a polymer fiber Bragg grating for high-sensitivity temperature measurements [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3409-3412.
- [61] Zwaan E, le Gac S, Tsuji K, et al. Controlled cavitation in microfluidic systems [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(25): 254501.
- [62] Dijkink R, Ohl C D. Laser-induced cavitation based micropump[J]. *Lab on a Chip*, 2008, 8(10): 1676-1681.
- [63] Noack J, Hammer D X, Noojin G D, et al. Influence of pulse duration on mechanical effects after laser-induced breakdown in water[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(12): 7488-7495.
- [64] Vogel A, Linz N, Freidank S, et al. Femtosecond-

- laser-induced nanocavitation in water: implications for optical breakdown threshold and cell surgery[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 038102.
- [65] Akhatov I S, Lindau O, Topolnikov A S, et al. Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble[J]. *Physics of Fluids*, 2001, 13(10): 2805-2819.
- [66] Li Y, Itoh K, Watanabe W, et al. Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(23): 1912-1914.
- [67] An R, Li Y, Dou Y P, et al. Laser micro-hole drilling of soda-lime glass with femtosecond pulses [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(12): 2465-2468.
- [68] Hwang D J, Choi T Y, Grigoropoulos C P. Liquid-assisted femtosecond laser drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(3): 605-612.
- [69] An R, Li Y, Dou Y P, et al. Simultaneous multi-microhole drilling of soda-lime glass by water-assisted ablation with femtosecond laser pulses [J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 1855-1859.
- [70] Li C X, Shi X, Si J H, et al. Fabrication of three-dimensional microfluidic channels in glass by femtosecond pulses [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(4): 657-660.
- [71] Li Y, Qu S L. Femtosecond laser-induced breakdown in distilled water for fabricating the helical microchannels array [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4236-4238.
- [72] Li Y, Qu S L, Guo Z Y. Fabrication of microfluidic devices in silica glass by water-assisted ablation with femtosecond laser pulses [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(7): 075008.
- [73] Li Y, Qu S L. Water-assisted femtosecond laser ablation for fabricating three-dimensional microfluidic chips[J]. *Current Applied Physics*, 2013, 13(7): 1292-1295.
- [74] Liu Y, Qu S L, Li Y. Liquid refractive index sensor with three-cascaded microchannels in single-mode fiber fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown[J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(4): 585-589.
- [75] Liu Y, Qu S L, Li Y. Single microchannel high-temperature fiber sensor by femtosecond laser-induced water breakdown[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 335-337.
- [76] Liu Y, Qu S L. H-type microchannel fiber humidity sensor by femtosecond laser-induced water breakdown [J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(19): 1578-1581.
- [77] Liu Y, Li M, Sun H H, et al. Ultrasensitive liquid refractometer based on a Mach-Zehnder micro-cavity in optical fibre fabricated by femtosecond laser-induced water breakdown [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(21): 2285-2290.
- [78] Liu Y, Wu G Q, Gao R X, et al. High-quality Mach-Zehnder interferometer based on a microcavity in single-multi-single mode fiber structure for refractive index sensing [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 847-853.