

# 基于飞秒激光微孔加工的温度补偿型光纤微流传感器

刘子溪, 李元鹏, 李杰\*, 武创, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 511443

**摘要** 研究一种基于激光微孔加工的温度补偿型光纤微流传感器。采用飞秒激光诱导水击穿的方法,在光纤布拉格光栅(FBG)和光纤镀金端面之间,刻写一条垂直于纤芯的均匀微流通道,制作单端反射式传感器,并对光谱进行快速傅里叶分析,可同时获得 FBG 和法布里-珀罗(F-P)谐振腔的波长信息。实验结果表明:FBG 和 F-P 谐振腔对外界环境温度及微流折射率具有不同的响应特性。通过检测 FBG 光谱频移可得到温度信息,再从 F-P 谐振腔光谱中扣除温度的影响部分,即可得到温度补偿的折射率信息。实验得到传感器在中心波长为 1550 nm 处的折射率灵敏度约为  $1.2038 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$  (RIU 为单位折射率),该数值可通过光纤结构进行优化,设计的传感器具有结构简单、操作方便及可实时检测等优点,在生物化学、医学等传感领域中拥有良好的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 飞秒激光加工; 微流通道; 温度补偿

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170619

## Temperature Compensated Fiber Optic Microfluidic Sensor Based on the Femtosecond Laser Drilling Technique

Liu Zixi, Li Yuanpeng, Li Jie\*, Wu Chuang, Guan Baiou

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications,

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China

**Abstract** A temperature compensated fiber optic microfluidic sensor by using the femtosecond laser drilling technique is realized and studied. A laser-induced water breakdown method is used to fabricate a uniform microfluidic channel perpendicular with the fiber core, between a fiber Bragg grating (FBG) and the gold-coated end face of the fiber. Then a single end reflective sensor is made. By performing the fast Fourier transformation to the reflection spectrum of the fabricated device, both the FBG and Fabry-Perot (F-P) cavity wavelength information can be restored. Experiment shows that the FBG and F-P cavity can have different responses to the external temperature and the microfluidic refractive index. As a result, the temperature information can be sensed by measuring the FBG spectral shift, while the refractive index information can be extracted from the FBG spectral shift with the temperature compensated. In our experiment, the measured refractive index sensitivity of the sensor at a center wavelength of 1550 nm is about  $1.2038 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$  (RIU is the unit refractive index). Analysis shows that the sensor performance can be further improved by optimizing the fiber structure. Our device is featured with structural simplification, easy operation, and real-time monitoring, and thus it can have good potential in both biochemical and medical areas.

**Key words** fiber optics; fiber optic sensors; femtosecond laser processing; microfluidic channel; temperature compensation

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 280.4788

## 1 引言

光纤微流传感器因具有体积小、灵敏度高、样品

容量小、可实时检测等优点,目前已被应用于制药、生物化学传感及环境污染检测等领域<sup>[1-2]</sup>。同时,光纤器件因质量轻、集成度高及易复用等优点,受到研

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-04-03; 录用日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61575083)、广东省自然科学基金杰出青年基金(2014A030306040)

\* E-mail: tjie@jnu.edu.cn

究者的青睐<sup>[3]</sup>,但如何研发光纤微流传感器引起许多研究者的关注<sup>[4-13]</sup>。研究者常利用现有的微结构光纤构建光纤微流传感器<sup>[5]</sup>,但构建的光纤结构相对固定,且光通道和微流通道相互靠近甚至重合,不利于结构的设计和系统的集成。近年来,随着飞秒激光加工技术的快速发展,研究者开始在光纤上通过打孔、开槽等方式制备微流传感器<sup>[6-10]</sup>,该处理方式使传感器设计更加灵活,便于制作各种微型光纤器件<sup>[8-10]</sup>。Wang 等<sup>[12]</sup>采用飞秒激光直接烧蚀法,分别在单模光纤(SMF)和光子晶体光纤中制作长周期光纤光栅,通过引入周期性几何结构的光纤,有效地减小光栅长度。然而,通过激光直接烧蚀形成的微流通道通常呈锥形漏斗状,表面较为粗糙,插入损耗也相对较大。Zhou 等<sup>[13]</sup>采用飞秒激光刻写与化学腐蚀相结合的方法,在两个布拉格光栅之间刻写一条类似矩形的开孔,开孔的长和宽分别为 $35\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 。与传统的光纤光栅传感器相比,设计的光纤光栅传感器可实现大范围及高灵敏度的折射率测量。不足的是,经过化学腐蚀的微流会使光纤变得脆弱,容易断裂。Liu 等<sup>[14]</sup>采用飞秒激光诱导水击穿的方法,在光纤中刻制几个平行的微流通道,成功地观测到模式干涉光谱,并进行折射率传感。

在实际应用中,环境温度变化通常是不可忽视的影响因素,会通过交叉响应并影响测量结果。为

了消除该影响,研究者需制作温控装置,使器件的工作温度保持稳定,这给操作带来较大的困难<sup>[15-17]</sup>。为了克服这个困难,本文设计一种基于飞秒激光微加工的温度补偿型光纤微流传感器。在光纤布拉格光栅(FBG)和镀金端面的中间刻写微孔,实现对环境温度和微流折射率的同时传感,通过光谱分析有效地消除温度的影响。此外,采用飞秒激光诱导水击穿并结合光纤光栅的制作方法,制作单端反射式传感器。该传感器可在密闭环境下对狭小空间的环境温度和微流折射率进行实时测量,具有制作效率高、集成度好及操作简单等优点,在生物化学、医学等传感领域中具有广泛的应用前景。

## 2 器件的原理、制备及光谱特性

利用飞秒激光诱导水击穿方法在光纤样品上刻写微通道的系统图,如图 1(a)所示。飞秒激光(femtosecond laser)脉冲由钛蓝宝石再生放大激光系统(Coherent 公司提供)产生,激光脉冲的功率通过调节衰减片(attenuator)和偏振片(polarizer)来控制,激光脉冲的加工时间和脉冲个数通过快门(shutter)来控制。通过物镜(OBJ)对激光脉冲进行聚焦,聚焦后的激光照射到被水平放置在由电脑控制的三维位移平台上的光纤。整个飞秒激光加工的过程通过 CCD 相机进行实时监测。

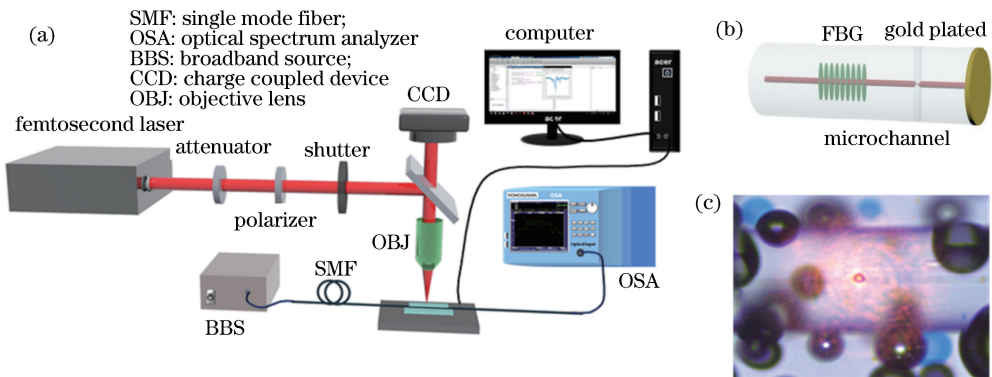


图 1 飞秒激光加工光纤微流传感器。(a)飞秒激光加工的系统图;(b)光纤器件的结构示意图;(c)激光诱导水击穿方法加工微流通道的显微照片

Fig. 1 Fiber microfluidic sensor fabricated by femtosecond laser. (a) Diagram of femtosecond laser processing; (b) diagram of the device; (c) microscopic photograph of real-time processing of laser induced water breakdown

图 1(b)为实验中光纤微流传感器的结构示意图,在 FBG 和光纤镀金端面之间,制作一条垂直于纤芯的均匀微流通道。光纤微流传感器的制备步骤如下。1)采用波长为  $193\ \text{nm}$  的准分子激光器和周期为  $1067.16\ \text{nm}$  的相位掩模版,在单模光纤上刻写一段长为  $10\ \text{mm}$  的布拉格光栅。该光栅的中心波

长在  $1550\ \text{nm}$  附近,透射深度为  $10\ \text{dB}$ 。2)距离光栅  $12\ \text{mm}$  的位置切出平滑的光纤端面,并使用毛细管封装光纤。该过程需保证只有光纤端面露出,防止在后续的端面镀金过程中飞溅的金离子附着在光纤侧面从而影响实验结果。利用粒子磁控溅射仪给光纤端面镀上一层高反射率金膜,实验中,设置镀膜

时间为 150 s,得到的金膜厚度约为 50 nm,可实现对光纤中光能量的反射。3)在光栅和光纤端面中间位置利用飞秒激光刻写出所需要的微流通道。加工时,把激光聚焦到光纤下表面,即光纤下方与水接触的位置,利用程序控制三维位移平台移动,使激光焦点的位置逐步上移,直至整个微流通道加工完成。实验所采用的飞秒激光脉冲的重复频率、中心波长和脉冲宽度分别为 1000 Hz、800 nm 和 40 fs,飞秒激光功率为 15 mW。该方法的优点如下:1)从下表面通道口处进入的水不会造成激光焦点的散射,有利于制作出比较均匀的微流通道;2)基于激光诱导作用,加工后的材料碎屑由水流排出,不会附着在通道内。因此,该方法的加工过程更加快捷,大概需要 1 min 便可完成。图 1(c)为采用激光诱导水击穿方法加工的微流通道的显微照片。从图 1(c)可以清晰地看到加工形成的微孔,微孔周围的气泡为加工过程中高速水射流产生的一些水气泡。

从原理上说,如图 1(b)所示,当光源产生的光从 FBG 端进入光纤后,其中一部分光被 FBG 反射回来,而另一部分则透过光栅继续前行,穿过微流通道,到达光纤镀金端面后被反射回来,与被 FBG 反射的光形成法布里-珀罗(F-P)干涉。因此,被器件

反射的光既包括 FBG 的光谱信息,又包括 F-P 谐振腔的光谱信息。对于 FBG 而言,中心波长  $\lambda_B = 2n_{si}\Lambda$ ,其中, $n_{si}$ 为光纤模式的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期。当外界温度发生变化时,由于 FBG 的热膨胀效应和热光效应, $\Lambda$ 和  $n_{si}$ 均会发生改变,从而导致中心波长  $\lambda_B$  漂移。由于微流通道不在 FBG 上,微流折射率不会影响 FBG 的中心波长,而光纤包层外折射率的变化对 FBG 模式的影响可忽略不计。因此,FBG 的中心波长变化量可表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_{si} + \beta_{si})\Delta T = K_1\Delta T, \quad (1)$$

式中: $\alpha_{si}$ 和  $\beta_{si}$ 分别为光纤介质的热膨胀系数和热光系数; $K_1$ 为常数; $\Delta T$ 为外界温度变化量。因此,FBG 的中心波长与外界温度存在一定的线性关系。

对于 F-P 谐振腔而言,干涉腔长主要由两个反射器之间的光纤和微流通道构成,假设光纤部分的长度为  $L_{si}$ ,微流通道的直径为  $L_1$ ,微流通道内光的有效折射率为  $n_1$ ,则干涉光谱的相位差可表示为  $\varphi = 4\pi(n_{si}L_{si} + n_1L_1)/\lambda$ ,其中  $\lambda$  为波长。当外界温度和微流通道内的折射率变化分别为  $\Delta T$  和  $\Delta N$  时,假设相位差的变化量为零,可计算出 F-P 谐振腔的波长随外界温度和折射率变化的关系式<sup>[18]</sup>,即

$$\Delta\lambda_{F-P} = \frac{\lambda}{n_{si}L_{si} + n_1L_1} \left\{ [n_{si}L_{si}(\alpha_{si} + \beta_{si}) + n_1L_1(\alpha_1 + \beta_1)]\Delta T + L_1 \frac{dn_1}{dN}\Delta N \right\} = K_2\Delta T + K_3\Delta N, \quad (2)$$

式中: $\alpha_1$ 和  $\beta_1$ 分别为微通道介质的热膨胀和热光系数; $N$ 为通道内微流体的折射率; $\frac{dn_1}{dN}$ 为微孔的有效折射率随  $N$  的变化比率; $K_2$ 和  $K_3$ 为常数。因此,从理论上说,F-P 谐振腔与外界温度及微流通道折射率均存在着一定的线性依赖关系。

在实际应用中,(1)式和(2)式中  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  的大小可通过实验获得,通过测量 FBG 中心波长和

F-P 谐振腔波长的漂移,推知外界温度和通道折射率的变化。

为了清楚地观察,对激光加工微孔的显微照片进行放大,如图 2 所示。图 2(a)和图 2(b)分别是微孔的上、下表面。图 2(c)是光纤微孔通道的侧面透视图,从图 2(c)看到一条清晰且直径均匀的微孔通道,微孔通道直径约为 10  $\mu\text{m}$ ,贯穿整个光纤。

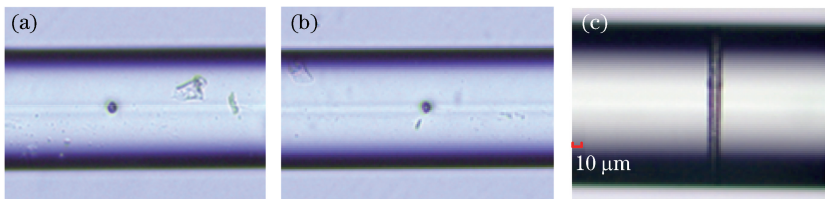


图 2 激光加工微孔的显微照片。(a)上表面;(b)下表面;(c)侧向透视图

Fig. 2 Microscopic photograph of the microchannel. (a) Top view; (b) bottom view; (c) side view

在实验中,宽带光源由 Golight 公司提供,其光谱范围为 1250~1650 nm。采用 Yokogawa 公司提

供的型号为 AQ6370D 的光谱仪来记录器件的反射光谱,其分辨率为 0.02 nm。在波长为 1549~



1551 nm的范围内,使用光谱仪的采样点数为 2000,将光谱分辨率和采样点数相结合,可基本满足对实验数据记录的要求,而更高精度的测量可通过高精度光谱仪来实现。传感器制作过程中的反射光谱如图 3 所示。由于传感器的反射光谱同时包括 FBG 和 F-P 谐振腔的光谱信息,为了获得这些信息,采用快速傅里叶变换(FFT)的方法对反射光谱进行处理。由图 3 可知,F-P 谐振腔光谱主要为高频变化的光谱,光谱周期为 0.0766 nm (频率为  $13.05 \text{ nm}^{-1}$ ),而 FBG 光谱主要为慢频变化的光谱。在采用 FFT 方法滤波时,设定滤波频率为  $8 \text{ nm}^{-1}$ ,图 3 中的虚线(after FFT)为经 FFT 滤波后得到的光谱。由图 3 所示,滤波后的中心波长与单个 FBG 的中心波长完全一致。

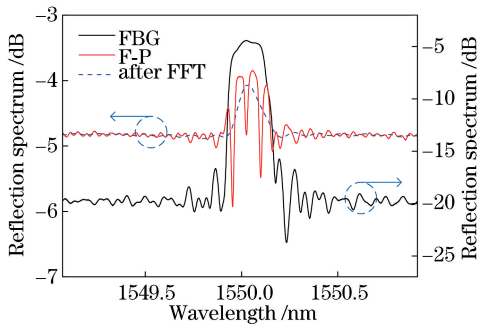


图 3 传感器的反射光谱图

Fig. 3 Reflection spectra of the fiber microfluidic sensor

## 3 传感器温度与折射率灵敏度特性

### 3.1 温度系数

为研究该传感器的温度响应特性,将整个器件置于温控盒中,温度通过可变电阻进行实时控制。将温控盒的温度  $t$  从  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  逐步升高至  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,待光谱稳定后对光谱信息每间隔  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  进行一次记录。图 4(a)为传感器在不同温度下反射光谱的漂移情况,布拉格光栅的中心波长随温度增加而发生红移。通过线性拟合可获得传感器的布拉格光栅对温度的灵敏度为  $0.01379 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,线性拟合度为 98.6%。各干涉波长随温度的变化关系如图 4(b)所示,通过线性拟合,得到 dip A 的温度灵敏度为  $0.01526 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , dip B 的温度灵敏度为  $0.01549 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , dip C 的温度灵敏度为  $0.01545 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,三者对应的线性拟合度分别为 98.2%、98.7%和 98.8%。上述结果表明,FBG 的中心波长和 F-P 谐振腔的波长均与温度变化呈线性相关,与理论分析(1)式和(2)式的结果一致。

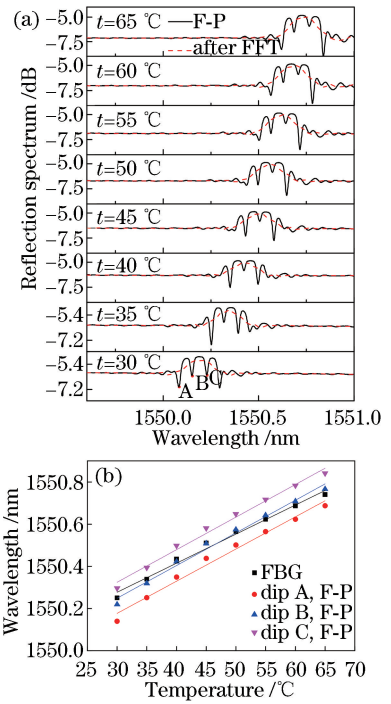


图 4 传感器的温度响应特性。(a)传感器在不同温度下的反射光谱图;(b)传感器件波长与温度的拟合线性图

Fig. 4 Temperature response characteristics of sensors.

(a) Reflection spectra of the sensor at different temperatures; (b) F-P and FBG wavelengths as function of temperature

### 3.2 折射率灵敏度

为得到传感器的折射率响应特性,利用不同浓度的葡萄糖溶液配制成不同折射率  $n$  的溶液, $n$  的变化范围为  $1.333 \sim 1.383$ ,通过针管装置将不同溶液分别引入光纤微流通道中,在光谱仪中实时观察光谱的变化。为提高实验的准确性,每次检测完一组折射率数据后,用去离子水将微流通道洗净并烘干,待光谱仪回到原始状态后,再测定下一组溶液的折射率。

图 5(a)为传感器在不同溶液折射率下的反射光谱图,其中实线(F-P)为传感器的光谱图,虚线(after FFT)为经 FFT 处理后的光谱图。可以看出,随着微流折射率的升高,FBG 对应的反射峰变化不大,而 F-P 谐振腔对应的梳状峰则出现明显的红移。这是因为随着微流折射率的升高,F-P 谐振腔的有效腔长增大,光在 F-P 谐振腔中往返传输经过的光程更长。F-P 谐振腔和 FBG 的波长与折射率的变化关系如图 5(b)所示,通过线性拟合,F-P 谐振腔的 dip A、dip B、dip C 所对应的灵敏度分别为  $1.14169, 1.2038, 0.9968 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$  (RIU 为单位折射率),对应的线性拟合度分别为 98.5%、

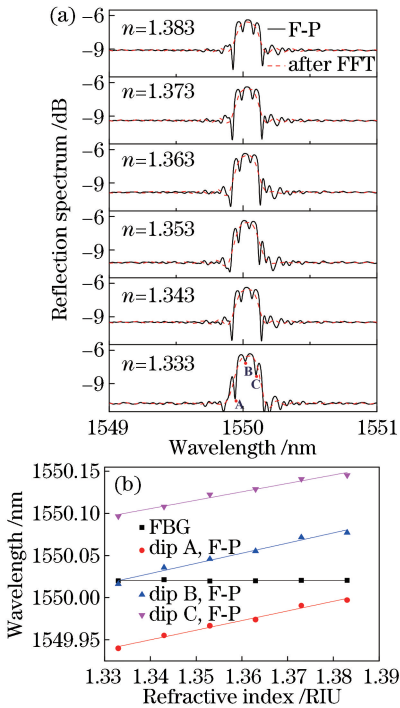


图5 传感器的折射率响应特性。(a)传感器在不同折射率下的反射光谱图;(b) F-P 谐振腔和 FBG 波长与折射率的变化关系

Fig. 5 Refractive index response characteristics of sensors. (a) Reflection spectra of the sensor at different refractive indices; (b) F-P and FBG wavelengths as function of the refractive index

97.5%和 97.6%。相比较而言,FBG 的灵敏度则仅为  $0.00106 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ ,这主要由测量误差造成,可以忽略不计。由(2)式可知,传感器的折射率灵敏度  $K_3$  与微流通道的尺寸有关,增加微孔直径、减小 F-P 谐振腔长或增加微流通道数量均可使器件的灵敏度获得进一步提升。

通过以上分析可知,FBG 的中心波长对温度变化具有明显的响应,但对溶液折射率几乎没有响应,而 F-P 谐振腔的光谱对微流折射率、环境温度均有着显著响应。因此,通过对传感器的单一反射谱进行检测和分析可同时获得外界温度及微流折射率的参数信息。当折射率和温度同时发生变化时,由 FBG 波长的漂移推知温度变化量,再从 F-P 谐振腔光谱中减掉温度影响的部分,即可获得温度补偿后微流折射率的变化信息。

## 4 结 论

通过利用飞秒激光诱导水击穿的方法在 FBG 和光纤镀金端面之间进行微孔加工,实现一种单端反射式的温度补偿型光纤微流传感器。该传感器同

时具备 FBG 和 F-P 谐振腔的光谱特性,可有效解决传统光纤微流传感器中存在的温度影响的问题。实验得到该传感器在中心波长为 1550 nm 的折射率灵敏度约为  $1.2038 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ ,该数值可通过光纤结构设计进行优化。本文所设计的传感器具有结构简单、集成度高和稳定性好等优点,可在密闭环境下对狭小空间的温度和折射率进行实时测量,在生物化学和医学等传感领域中具有良好的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Song P, Jing Z G, Li A, *et al.* Refractive index measurement of liquid based on open fiber Fabry-Perot interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1204007.  
宋鹏, 荆振国, 李昂, 等. 基于光纤开放式法布里-珀罗干涉仪的液体折射率测量[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204007.
- [2] Ju Y, Liu C, Liao Y, *et al.* Direct fabrication of a microfluidic chip for electrophoresis analysis by water-assisted femtosecond laser writing in porous glass[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(7): 072201.
- [3] Lai Y, Zhou K, Zhang L, *et al.* Microchannels in conventional single-mode fibers[J]. Optics Letters, 2006, 31(17): 2559-2561.
- [4] Marowsky G. Planar waveguides and other confined geometries: theory, technology, production, and novel applications[M]. New York: Springer, 2014: 69-83.
- [5] Wu D K C, Kuhlmeier B T, Eggleton B J. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 322-324.
- [6] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.
- [7] Liao Y, Zeng B, Qiao L, *et al.* Threshold effect in femtosecond laser induced nanograting formation in glass: influence of the pulse duration[J]. Applied Physics A, 2014, 114(1): 223-230.
- [8] Osellame R, Maselli V, Vazquez R M, *et al.* Integration of optical waveguides and microfluidic channels both fabricated by femtosecond laser irradiation[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(23): 231118.
- [9] Ning G Y, Fu G, Shi M, *et al.* Fabrication of optical fiber U-shaped microstructure by femtosecond laser and its application in refractive index sensing[J].

- Laser Technology, 2017, 41(6): 916-920.
- 宁贵毅, 傅贵, 史萌, 等. 飞秒激光制备光纤 U 形微结构应用于折射率传感 [J]. 激光技术, 2017, 41(6): 916-920
- [10] Fu H, Zhou K, Saffari P, *et al.* Microchanneled chirped fiber Bragg grating formed by femtosecond laser-aided chemical etching for refractive index and temperature measurements [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1609-1611.
- [11] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(4): e149.
- [12] Wang Y, Wang D N, Yang M, *et al.* Refractive index sensor based on a microhole in single-mode fiber created by the use of femtosecond laser micromachining[J]. Optics letters, 2009, 34(21): 3328-3330.
- [13] Zhou K, Yan Z, Zhang L, *et al.* Refractometer based on fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity embedded with a narrow microchannel [J]. Optics Express, 2011, 19(12): 11769-11779.
- [14] Liu Y, Qu S, 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.
- [15] Teng L, Zhang H, Dong Y, *et al.* Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4413-4416.
- [16] Jia P, Fang G, Liang T, *et al.* Temperature-compensated fiber-optic Fabry-Perot interferometric gas refractive-index sensor based on hollow silica tube for high-temperature application [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 244: 226-232.
- [17] Shi F F, Zhao C L, Xu B, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on optical fiber cavity sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0306003.
- 时菲菲, 赵春柳, 徐贲, 等. 基于光纤微腔的温度及折射率同时测量型传感器 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0306003.
- [18] Li J, Sun L P, Gao S, *et al.* Ultrasensitive refractive-index sensors based on rectangular silica microfibers[J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3593-3595.