

飞秒激光刻写低温度灵敏度的细芯长周期光栅

明昕宇¹, 国旗¹, 薛兆康¹, 潘学鹏¹, 陈超², 于永森^{1*}

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130012;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:在折射率与应变测试时,为了降低温度影响所引起的串扰,对细芯长周期光纤光栅的温度、折射率和应变响应特性进行了研究。通过飞秒激光直写方法在纤芯直径为 $6\ \mu\text{m}$ 的单模光纤上成功制备了周期为 $50\ \mu\text{m}$ 的长周期光纤光栅。结果表明:在细芯光纤中以低激光能量加工的长周期光纤光栅具有较低的温度灵敏度,同时保持较大的消光比和较好的光谱质量。这种细芯长周期光纤光栅损耗峰在 $20\sim 700\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内仅漂移 $1.7\ \text{nm}$ 。该光栅对折射率变化也具有较好的响应,环境折射率在 $1.4065\sim 1.4265$ 时,灵敏度最高可达 $882.51\ \text{nm}/\text{RIU}$,应变灵敏度为 $-2.2\ \text{pm}/\mu\text{e}$ 。这种细芯长周期光纤光栅可以较好地降低折射率与应变测试中由于温度影响带来的串扰。

关键词:细芯光纤;飞秒激光直写;光纤传感;长周期光栅

中图分类号:TN253 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2020-0015

A femtosecond laser-inscribed fine-core long-period grating with low temperature sensitivity

MING Xin-yu¹, GUO Qi¹, XUE Zhao-kang¹, PAN Xue-peng¹, CHEN Chao², YU Yong-sen^{1*}

(1. *State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;*

2. *State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yuys@jlu.edu.cn*

Abstract: In order to reduce crosstalk caused by temperature during refractive index and strain testing, the temperature, refractive index and strain response characteristics of fine-core long-period fiber gratings were studied. A long-period fiber grating with a period of $50\ \mu\text{m}$ was successfully prepared on a single-mode fiber with a core diameter of $6\ \mu\text{m}$ using the femtosecond laser direct writing method. The results show that long-

收稿日期:2020-01-21; 修订日期:2020-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(No.91860140, No.618741119); 吉林省科技发展规划项目(No.20180201014GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.91860140, No.618741119); Technology Development Project of Jilin Province (No.20180201014GX)

period fiber gratings processed with low laser energy in fine-core fibers have lower temperature sensitivity, and maintain a larger extinction ratio and better spectral quality. The loss peak of this fine-core long-period fiber grating drifts only 1.7 nm in the 20~700 °C temperature range. The grating is also highly responsive to changes in the refractive index. when ambient refractive index is in the range of 1.4065~1.4265, its sensitivity reaches 882.51 nm/RIU, and its strain sensitivity is -2.2 pm/με. This fine-core long-period fiber grating can better reduce crosstalk caused by temperature in the refractive index and strain tests.

Key words: fine-core fiber; femtosecond laser direct writing; fiber sensor; long-period fiber gratings

1 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)由于具有体积小,抗干扰,抗腐蚀等优良特性,广泛应用于航天航空、船舶、桥梁以及铁路等苛刻环境中^[1-8]。在过去几十年里,光纤光栅在传感领域取得了非常大的进步^[9-13],而长周期光栅(Long-Period Gratings, LPG)的出现也使得光纤传感在传感领域能够发挥更大的作用^[14-19]。虽然 LPG 能够测量很多环境参量,但是由于 LPG 对很多物理量敏感^[20],例如温度,应变,折射率等,导致其在测试过程中会存在交叉敏感问题,使得测量结果不精确。已经有很多文献提出了解决交叉敏感问题的方法^[21-25],例如将 LPG 与 FBG 级联^[26],以及通过在光栅上涂覆材料^[27-29]来解决测试时出现的交叉敏感问题。2013年,吉林大学的 Jing-Chun Guo 等人使用 4% 的氢氟酸溶液腐蚀光纤,制作了一种能够测试折射率与应变的紧凑型微孔光纤光栅^[30],其温度灵敏度仅为 9.95 pm/°C。虽然这些方法都能够有效降低温度所带来的串扰影响,但是无论是通过级联、涂覆材料,还是采用氢氟酸溶液腐蚀等方法均会增加器件制作的复杂程度,也会导致器件的机械强度降低。在以往的报道中,以电弧放电^[31]和二氧化碳激光器烧蚀制备的 LPG^[32]的光栅折射率调制区较大,温度灵敏度较高。传统紫外光刻写光纤光栅的方法所得到的 I 型光栅不能承受较高的温度,在高温情况下易被擦除^[33]。而相位掩模法刻写光栅的方法并不灵活且成本较高^[34]。本文使用飞秒激光^[35-37]直写的方法在纤芯直径为 6 μm 的单模光纤中刻写了周期为 50 μm 的 LPG,得到了细芯长周期光纤光栅(Fine-Core Long-Period Gratings, FC-LPG)。经过 700 °C 高温退火 3 小时后进行测试,发现其温度

灵敏度较低,并对应变和折射率的变化有较好的光谱响应。

2 长周期光栅温度特性分析

在光栅加热的过程中,由于热光效应和热膨胀效应的存在,光纤纤芯和包层材料的有效折射率及光栅周期都会发生改变,使得透射峰能够随着温度的变化而发生漂移。

LPG 中纤芯模将与同向传输的包层模发生耦合,继续传输一段距离后辐射到外界,在透射谱上形成损耗峰,其满足以下的相位匹配条件:

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda, \quad (1)$$

式中: λ_{res} 为谐振波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯和 m 阶包层模的有效折射率,若此时光栅只受到温度影响,则将式(1)中的 λ_{res} 对 T 求导可以得到 LPG 谐振波长的温度灵敏度,为:

$$K_T = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} = \lambda_{\text{res}}^m \cdot \gamma^m \cdot [\alpha + \Gamma_{\text{temp}}^m], \quad (2)$$

式中: λ_{res} 为 m 阶次谐振峰的波长, α 为光纤的有效热膨胀系数, γ^m 和 Γ_{temp}^m 分别表示光纤波导色散因子和温度灵敏度因子,表达式如下:

$$\gamma^m = \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{\text{res}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}} \frac{d(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})}{d\lambda}}, \quad (3)$$

$$\Gamma_{\text{temp}}^m = \frac{\xi_{\text{eff}}^{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{eff}}^{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}, \quad (4)$$

其中, $\xi_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\xi_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯和包层的有效热光系数^[38]。

从式(4)可以看出,影响 K_T 的主要因素包括有效热光系数、纤芯和包层的有效折射率差。加

工分辨率可以用激光聚焦光斑直径 D 来衡量:

$$D = 1.22\lambda/NA, \quad (5)$$

式(5)中: λ 为激光波长, NA 为聚焦物镜的数值孔径。当使用短波长激光(515 nm)和较大的数值孔径物镜(Olympus 油浸物镜, $NA=1.42$)加工时,可以在光纤纤芯内获得较小的聚焦光斑。采用低激光能量进行加工时,折射率调制区会更小,纤芯和包层折射率差越小,温度灵敏度因子越小,从而温度灵敏度越低。

3 飞秒激光制备 FC-LPG

光纤光栅飞秒激光直写系统如图 1(彩图见期刊电子版)所示,本文使用的飞秒激光(Light-Conversion Pharos)波长为 1 030 nm,脉宽为 290 fs,重复频率和单脉冲能量分别为 10 kHz 和 56 nJ。1 030 nm 飞秒激光经过倍频晶体(β -BaB₂O₄)倍频后获得了波长为 515 nm 的飞秒激光。通过 60 倍高数值孔径油浸物镜将激光聚焦在细芯单模光纤(Nufern 1 060-XP)中,并通过 CCD 实时观察光纤制备过程。

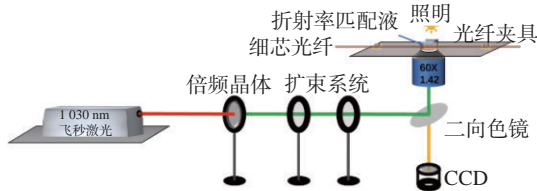


图 1 飞秒激光直写 LPG 的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device for femtosecond laser direct writing LPG

将光纤浸在折射率匹配液中,使用光纤夹具将光纤固定在精度为 20 nm 的三维气浮平台(Aerotech)上,通过计算机控制三维位移平台移动,光纤的移动速度为 0.1 mm/s,通过控制激光器光闸开关来控制 LPG 的占空比,光闸开关周期为 0.25 s,光栅周期 A 为 50 μm ,占空比为 1 : 1,周期数为 300,光栅长度为 15 mm。图 2(彩图见期刊电子版)为加工后芯径为 6 μm 的细芯单模光纤显微照片和横截面显微镜照片。

图 3 是 FC-LPG 退火前的透射光谱,从光谱图中可以看出损耗峰 A 的消光比较高,测试时可获得较高的分辨率,故选择此损耗峰作为测试峰。

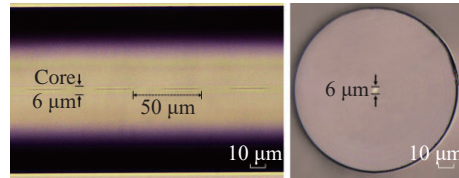


图 2 LPG 的 CCD 照片与光纤横截面显微镜照片

Fig. 2 CCD photo of LPG and fiber cross section microscope photo

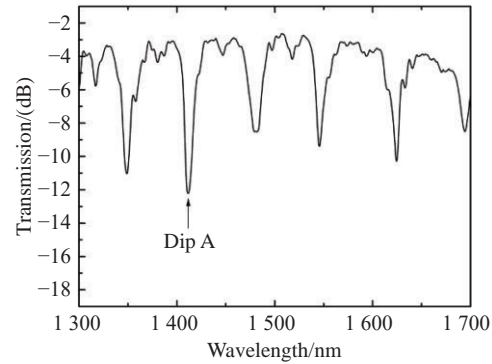


图 3 FC-LPG 透射光谱

Fig. 3 FC-LPG transmission spectrum

4 FC-LPG 的传感性能测试

4.1 温度响应测试

将光栅置于管式炉中进行高温退火,测试从室温开始进行,每次升温 100 $^{\circ}\text{C}$,保温 30 min,并记录光谱,退火温度达到 700 $^{\circ}\text{C}$ 时,使用宽带光源(Superk Compact, NKT Photonics)和光谱仪(AQ6370B, Yokogawa)进行测试。波长随温度变化曲线如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

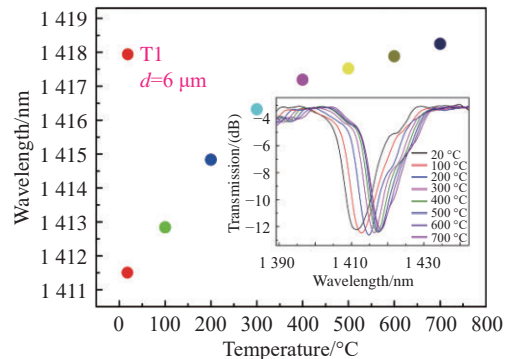


图 4 退火过程谐振波长随温度变化曲线

Fig. 4 Relationship between resonance wavelength and temperature during annealing

从图 4 可以看出,退火过程中,当温度由 20 $^{\circ}\text{C}$

升温到 300 °C 时, 光谱红移了 5 nm, 由 300 °C 升到 700 °C 时, 光谱红移了 2.18 nm。这主要是由于随着温度的升高和退火时间的增加, 光纤内部应力逐渐释放, 导致光谱整体红移。

退火后和退火前的透射光谱对比结果如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示, 退火后光纤内应力释放, 相比于退火前, 退火后整体透射光谱发生红移。此外, 退火对光纤内部加工区域有一定的热修饰作用, 呈现出较大的消光比和较好的光谱质量。

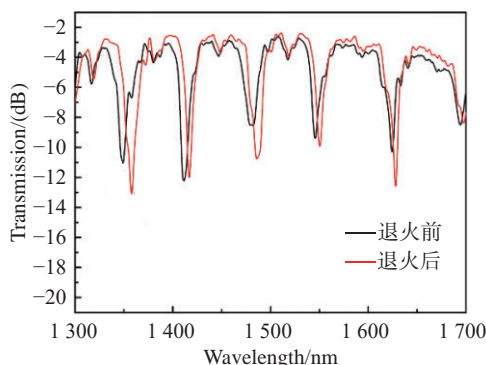


图 5 退火前后透射峰对比图

Fig. 5 Comparison of transmission peaks before and after annealing

在光纤退火后, 又对其进行了温度重复测试。将测试温度从室温升到 700 °C, 每次升温 100 °C, 保温 30 min 并记录光谱。测试结果如图 6 (彩图见期刊电子版) 所示。可见, 室温时峰 A 位于 1416.78 nm 处, 温度升到 700 °C 时, 峰 A 红移到 1418.48 nm, 仅红移 1.7 nm。在 FC-LPG 的制备过程中, 515 nm 飞秒激光经过高数值孔径油浸物镜聚焦后, 可以在光纤纤芯内获得较小的聚焦区域, 同时以较低能量进行加工, 这样折射率调制深度会变的更小。由式 (4) 可以得出, 当纤芯折射率调制深度变小时, 温度灵敏度因子变小, 从而使温度灵敏度变低。

当单脉冲能量相同时, 在纤芯直径为 9 μm 的单模光纤 (Corning SMF-28) 中刻写了与 FC-LPG 的实验参数一致的 LPG, 两种光纤光栅的透射光谱对比结果如图 7 所示。可见, 细芯光纤光栅透射谱的消光比较大, 光谱质量较好。由于使用相同能量加工, 激光调制区域相同, 芯径较细的光纤, 同向传输的纤芯模和包层模的耦合效率更高, 可以获得具有较大消光比的 LPG。

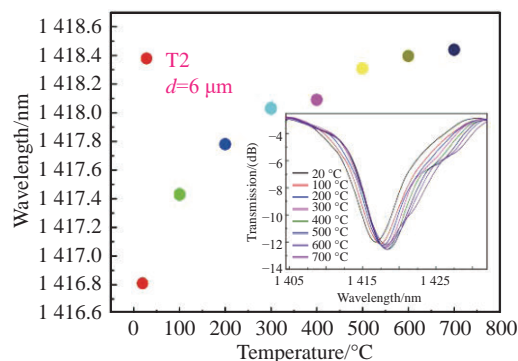


图 6 退火后谐振波长随温度变化曲线

Fig. 6 Resonance wavelength varying with temperature after annealing

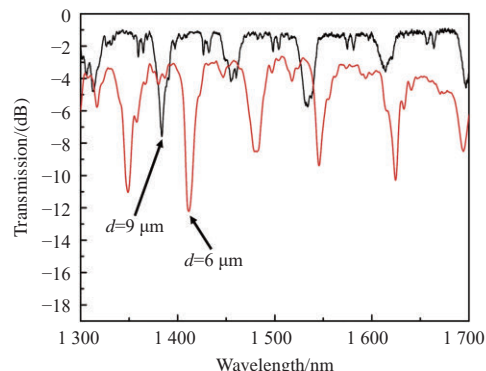


图 7 不同纤芯直径的单模光纤光栅透射谱对比

Fig. 7 Comparison of transmission spectra of single-mode fiber gratings with different core diameters

对芯径为 9 μm 的 LPG 进行温度测试, 从室温逐渐升温到 700 °C, 如图 8 (彩图见期刊电子版) 所示。

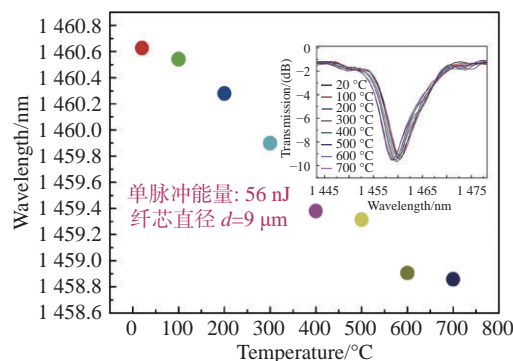


图 8 纤芯直径为 9 μm 的光纤中刻写的 LPG 的温度响应测试

Fig. 8 Temperature response test of LPG written in optical fiber with a core diameter of 9 μm

由图8可知,从20℃到700℃,透射峰仅红移1.88 nm。这主要是由于低功率飞秒激光刻写的LPG,纤芯折射率调制深度较小,温度灵敏度较低。

4.2 FC-LPG 折射率响应测试

对FC-LPG的折射率和轴向应变响应进行了研究。首先,将FC-LPG浸入到折射率为1.3400~1.4265的甘油水混合溶液中进行测试。每次测试后使用无水乙醇和去离子水进行清洗,直到光谱恢复为原始光谱。从图9(彩图见期刊电子版)可以看出,在不同的折射率溶液中,FC-LPG的透射峰发生红移。峰A在1.3400~1.4265折射率范围内随着折射率的增加表现出了良好的光谱响应。在折射率范围分别为1.3400~1.3850和1.3850~1.4065时,峰A的灵敏度分别为142.81 nm/RIU和307.72 nm/RIU。环境折射率值在1.4065~1.4265范围内,灵敏度最高可达882.51 nm/RIU。

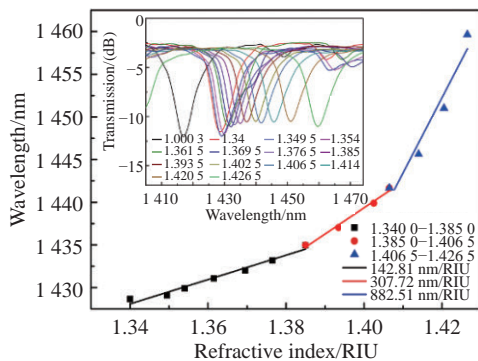


图9 透射峰随折射率变化灵敏度曲线以及波长漂移曲线
Fig. 9 Refractive index response curve and sensitivity curve

4.3 FC-LPG 应变响应测试

使用应变测试仪对FC-LPG的轴向应变进行测试。轴向应变公式如下:

$$\varepsilon = \frac{F}{\pi r^2 E}, \quad (6)$$

式中: F 是光纤轴向拉力, r 是光纤包层半径, E 是石英的杨氏模量,轴向应变可以由式(6)算出。

FC-LPG的应变测试结果如图10所示。测

参考文献:

- [1] GUO Q, YU Y S, ZHENG ZH 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.

试时,应力从0增加到0.9 N,间隔为0.1 N,并记录该光谱。应变的测试范围为0~1008 $\mu\epsilon$ 。从图10可以看出,随着应变的增加,FC-LPG透射光谱发生蓝移,应变响应较好,应变灵敏度为-2.22 pm/ $\mu\epsilon$ 。

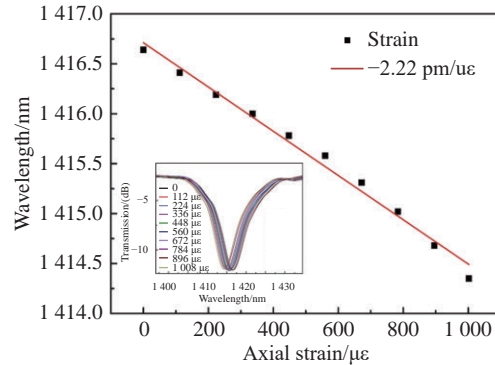


图10 谐振波长与应变拟合曲线以及光谱漂移曲线
Fig. 10 Resonance wavelength and strain fitting curve and spectral drift curve

5 结论

本文使用飞秒激光直写的方法在芯径为6 μm 的细芯光纤上刻写了长周期光栅,并对其温度、折射率、应变响应进行测试。与大芯径光纤相比,对于芯径较小的光纤,加工时使用较低的激光能量就可以获得较大消光比和较好光谱分辨率的LPG。这种FC-LPG的纤芯折射率调制深度较小,使其具有较低的温度灵敏度。退火后的FC-LPG,在20~700℃温度范围,光谱仅红移1.7 nm。FC-LPG对折射率和应变的变化也具有较好的响应特性。在折射率范围为1.3400~1.3850和1.3850~1.4065时,折射率灵敏度分别为142.81 nm/RIU和307.72 nm/RIU。在环境折射率值为1.4065~1.4265时,折射率灵敏度可达882.51 nm/RIU。在0~1008 $\mu\epsilon$ 范围内,应变灵敏度为-2.22 pm/ $\mu\epsilon$ 。由于FC-LPG温度灵敏度较低,而折射率和应变响应较好,可为解决因温度所带来的交叉敏感问题提供理论参考和实验依据。

- [2] BROADWAY C, KINET D, THEODOSIOU A, *et al.*. CYTOP fibre Bragg grating sensors for harsh radiation environments[J]. *Sensors*, 2019, 19(13): 2853.
- [3] BLANCHET T, DESMARCHELIER R, MORANA A, *et al.*. Radiation and high temperature effects on regenerated fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4763-4769.
- [4] DÍAZ C A R, LEAL-JUNIOR A, MARQUES C, *et al.*. Optical fiber sensing for sub-millimeter liquid-level monitoring: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(17): 7179-7191.
- [5] YANG SH, HOMA D, HEYL H, *et al.*. Application of sapphire-fiber-Bragg-grating-based multi-point temperature sensor in boilers at a commercial power plant[J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3211.
- [6] LI R Y, CHEN Y Y, TAN Y G, *et al.*. Sensitivity enhancement of FBG-based strain sensor[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1607.
- [7] 石胜辉, 赵明富, 罗彬彬, 等. 扭转螺旋型力学微弯长周期光纤光栅的光谱特性[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1771-1776.
SHI SH H, ZHAO M F, LUO B B, *et al.*. Spectral characteristics of helicoidal mechanically-induced long-period fiber grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1771-1776. (in Chinese)
- [8] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 311-317.
WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 311-317. (in Chinese)
- [9] 侯尚林, 葛伟青, 刘延君, 等. 非均匀光子晶体光纤光栅慢光的研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(9): 1138-1142.
HOU SH L, GE W Q, LIU Y J, *et al.*. Investigation on slow light in nonuniform photonic crystal fiber gratings[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(9): 1138-1142. (in Chinese)
- [10] 张正义. 基于光纤光栅的一体式靶式流量传感技术[J]. *发光学报*, 2020, 41(2): 217-223.
ZHANG ZH Y. One-piece flow target type based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(2): 217-223. (in Chinese)
- [11] 翟玉峰, 张龙, 朱灵, 等. 光纤光栅称重传感器研究[J]. *发光学报*, 2007, 28(3): 412-415.
ZHAI Y F, ZHANG L, ZHU L, *et al.*. Novel weigh sensors based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2007, 28(3): 412-415. (in Chinese)
- [12] MARTIN-VELA J A, SIERRA-HERNANDEZ J M, MARTINEZ-RIOS A, *et al.*. Curvature sensing setup based on a fiber laser and a long-period fiber grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(15): 1265-1268.
- [13] DEGHANI S M, ESMAILZADEH N F, BAHRAMPOUR A, *et al.*. A proposal for distributed humidity sensor based on the induced LPFG in a periodic polymer coated fiber structure[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 117: 126-133.
- [14] LIU W L, SUN C T, GENG T, *et al.*. A new spring-shaped long-period fiber grating with high strain sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(14): 1163-1166.
- [15] CELEBANSKA A, CHINIFOROOSHAN Y, JANIK M, *et al.*. Label-free cocaine aptasensor based on a long-period fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2482-2485.
- [16] 黄新成, 吴小文, 高社成, 等. 角向二阶少模长周期光纤光栅的扭转响应特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1206001.
HUANG X CH, WU X W, GAO SH CH, *et al.*. Response characteristic of twisting second-order azimuthal-order few-mode long-period fiber grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1206001. (in Chinese)
- [17] WANG Y L, LIU Y Q, ZOU F, *et al.*. Humidity sensor based on a long-period fiber grating coated with polymer composite film[J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2263.
- [18] DOS SANTOS P S S, JORGE P A S, DE ALMEIDA J M M M, *et al.*. Low-cost interrogation system for long-period fiber gratings applied to remote sensing[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1500.
- [19] 何万迅, 施文康, 叶爱伦, 等. 长周期光纤光栅及其在通信传感领域的新应用[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2): 104-108.
HE W X, SHI W K, YE A L, *et al.*. Long period fiber grating and its new applications in communication and sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 104-108. (in Chinese)
- [20] ZHENG ZH M, YU Y S, ZHANG X Y, *et al.*. Femtosecond laser inscribed small-period long-period fiber gratings with

- dual-parameter sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1100-1103.
- [21] 李薇, 侯睿, 张志俊. 准分布式FBG对应变和温度双参数分离测量的实现[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 84-87.
LI W, HOU R, ZHANG ZH J. The implementation of two-parameter measurement of strain and temperature using quasi-distributed FBG[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2017, 36(4): 84-87. (in Chinese)
- [22] LIU H L, CHEN Y, CHEN L J, *et al.*. Concentration and temperature sensing accurately in a concatenated FBG and LPG[J]. *Optik*, 2015, 126(6): 649-654.
- [23] 杜洋, 衣文索, 刘丹, 等. 基于3×3耦合器的光纤光栅温度传感器解调系统[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 17-21.
DU Y, YI W S, LIU D, *et al.*. Demodulation system of fiber Bragg grating temperature sensors based on 3×3 fiber coupler[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 42(2): 17-21. (in Chinese)
- [24] 吴倩, 张诸宇, 郭晓晨, 等. 基于光子晶体光纤交叉敏感分离的磁场温度传感研究[J]. 物理学报, 2018, 67(18): 184212.
WU Q, ZHANG ZH Y, GUO X CH, *et al.*. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on photonic crystal field with eliminating cross-sensitivity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 184212. (in Chinese)
- [25] 李燕飞, 闫海涛, 鱼志云. 基于预应力的超低温漂光纤光栅封装技术实验研究[J]. 光学技术, 2019, 45(3): 368-372.
LI Y F, YAN H T, YU ZH Y. Experiential research of packaging technology for ultra-low-temperature drifted fiber Bragg grating based on pre-stress[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(3): 368-372. (in Chinese)
- [26] YUAN W, STEFANI A, BANG O. Tunable polymer fiber Bragg grating (FBG) inscription: fabrication of Dual-FBG temperature compensated polymer optical fiber strain sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(5): 401-403.
- [27] LIU Q, CHIANG K S, LOR K P, *et al.*. Condition for the realization of a temperature-insensitive long-period waveguide grating[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(18): 2716-2718.
- [28] DANDAPAT K, TRIPATHI S M, CHINIFOOROSHAN Y, *et al.*. Compact and cost-effective temperature-insensitive bio-sensor based on long-period fiber gratings for accurate detection of *E. coli* bacteria in water[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4198-4201.
- [29] CHEN H J, WANG L, LIU W F, *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating tilt sensor[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(4): 556-560.
- [30] GUO J C, YU Y S, XUE Y, *et al.*. Compact long-period fiber gratings based on periodic microchannels[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(2): 111-114.
- [31] SUN B, WEI W, LIAO CH R, *et al.*. Automatic arc discharge-induced helical long period fiber gratings and its sensing applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 873-876.
- [32] ZHANG Y X, ZHANG W G, YAN T Y, *et al.*. V-shaped long-period fiber grating high-sensitive bending vector sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(17): 1531-1534.
- [33] 李燕, 徐迈, 王庆亚, 等. 紫外写入光纤光栅应变传感特性研究[J]. 发光学报, 2000, 21(1): 61-63.
LI Y, XU M, WANG Q Y, *et al.*. Strain sensing properties of UV-written fiber grating[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2000, 21(1): 61-63. (in Chinese)
- [34] 李燕, 梁国栋, 徐迈, 等. 利用相位掩膜技术制备光纤光栅的紫外曝光系统[J]. 发光学报, 1996, 17(3): 266-268.
LI Y, LIANG G D, XU M, *et al.*. UV exposure equipment of fabricating fiber grating by a phase mask[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 1996, 17(3): 266-268. (in Chinese)
- [35] WU D, CHEN Q D, NIU L G, *et al.*. Femtosecond laser rapid prototyping of nanoshells and suspending components towards microfluidic devices[J]. *Lab on A Chip*, 2019, 9(16): 2391-2394.
- [36] XU B B, ZHANG Y L, XIA H, *et al.*. Fabrication and multifunction integration of microfluidic chips by femtosecond laser direct writing[J]. *Lab on A Chip*, 2013, 13(9): 1677-1690.
- [37] YIN D, FENG J, MA R, *et al.*. Efficient and mechanically robust stretchable organic light-emitting devices by a laser-

programmable buckling process[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 11573.

[38] 杨日星, 欧启标. 长周期光纤光栅的温度特性研究[J]. 科技信息, 2013(3): 80-81, 96.

YANG R X, OU Q B. Theoretical and experimental study on temperature characteristic of long-period fibre grating[J]. *Science & Technology Information*, 2013(3): 80-81, 96. (in Chinese)

作者简介:



明昕宇 (1994—), 男, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 2013 年于吉林大学获得学士学位, 现为吉林大学电子科学与工程学院硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 519113175@qq.com



于永森 (1974—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 2005 年于吉林大学获得博士学位, 现为吉林大学电子科学与工程学院教授, 主要从事光纤传感, 激光微纳加工研究。E-mail: yuys@jlu.edu.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(Ei)数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 数据库 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目: 微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061 传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号 (130033)