

少模光纤长周期光栅双峰谐振及双参量传感

郭艳城^{**}, 刘艳格^{*}, 王志, 姚卓坤

南开大学现代光学研究所天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350

摘要 在少模光纤中写制的纤芯 LP_{01} 模式向纤芯 LP_{11} 模式耦合的长周期光纤光栅具有双谐振耦合现象, 且该双谐振耦合峰随着温度或应变的增加向相反的波段漂移, 从理论和实验上揭示了该现象产生的机理, 并基于该现象及特性设计了温度、应变双参量传感器。与传统的基于纤芯基模与包层模耦合的长周期光纤光栅传感器相比, 该传感器具有折射率不敏感、光谱稳定、灵敏度高等优势。

关键词 光纤光学; 少模光纤; 长周期光纤光栅; 双峰谐振; 双参量传感

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0906003

Dual Resonance and Dual-Parameter Sensor of Few-Mode Fiber Long Period Grating

Guo Yancheng^{**}, Liu Yange^{*}, Wang Zhi, Yao Zhuokun

Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China

Abstract The phenomenon of dual resonance coupling exists in few-mode long period grating coupled between core modes LP_{01} and LP_{11} . The two resonant dips drift to opposite bands as temperature or strain increases. We research the mechanism of dual resonance from theory and experiment, and design a dual-parameter sensor of temperature and strain. Compared with the long period gratings coupled between core fundamental mode and cladding mode, this sensor has the advantages of refractive index insensitivity, spectrum stability, and high sensitivity.

Key words fiber optics; few-mode fiber; long period fiber grating; dual-peak resonance; dual-parameter sensor

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 050.2770

1 引 言

光纤布拉格光栅 (FBG) 与长周期光纤光栅 (LPG) 已经被广泛地应用于光纤传感领域^[1-3]。相比于纤芯模与反向传输的纤芯模耦合的 FBG, 纤芯模与同向传输模式耦合的 LPG 具有栅格周期较大、后向反射小等特点。其中, 因其包层模场易受外界环境影响, 在单模光纤上写制的纤芯模与包层模耦合的 LPG 可用于溶液浓度^[4-6]和外界折射率传感。近年来, 在气体、液体、湿度等传感领域, 国内外研究者已经针对 LPG 进行了广泛研究, 并取得了一些成果^[7-11]。

对于纤芯模与包层模耦合的 LPG, 当栅格周期比较小 (约为 $100 \mu\text{m}$) 时, 纤芯模向高次包层模耦合时会出现两个谐振峰, 这两个谐振峰在外界温度、折

射率等发生变化时会沿着不同的方向发生漂移。双峰的漂移成倍地增大了 LPG 对于外界变化的波长响应。基于此特性, 顾铮先等^[12]利用基于纤芯模与包层模耦合的双峰谐振镀金属 LPG 进行液体浓度传感, 在盐溶液的传感实验中, 双峰特性的 LPG 传感器的监测灵敏度明显高于普通的单峰光纤光栅。2013 年, Garg 等^[13]分别从模拟和实验两方面验证了基于两个 LPG 的高灵敏度折射率传感器的双峰效应, 并将其应用于折射率、温度和应力传感。单模光纤中纤芯与包层模耦合的 LPG 已得到广泛研究, 其包层模易受外界影响, 可用于外界折射率传感, 但是少模光纤中两个纤芯模式的双峰耦合现象及其在传感领域上的应用未见报道。

本文利用耦合模理论推导出少模光纤两个纤芯模间的 LPG 双峰耦合现象, 给出不同光栅周期下两

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-17; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(11674177, 61775107)、天津市自然科学基金(16JJCZDJ31000)

* E-mail: ygliu@nankai.edu.cn; ** E-mail: 15122166636@163.com

个谐振峰的变化情况。实验使用 CO₂ 激光器在少模光纤上写入 LPG, 并利用 LP₀₁ 与 LP₁₁ 模式两个谐振峰对温度和应变灵敏度响应不同的特点进行了温度和应变双参量传感。该传感器与传统的基于纤芯基模与包层模耦合的 LPG 传感器相比, 具有折射率不敏感、光谱稳定、灵敏度高优势, 可在外界折射率变化较大的环境中用于高灵敏度的温度和应变传感。

2 少模光纤 LPG 纤芯模双峰耦合及传感理论模拟

选取康宁公司的型号为 SMF-28e 的单模光纤 (截止波长小于 1260 nm, 纤芯和包层半径分别为 4.07 μm 和 62.5 μm) 作为少模光纤, 使用有限元软件 COMSOL MULTIPHYSICS 5.2 对少模光纤的模式特性进行分析可知, SMF-28e 单模光纤仅存在 LP₀₁ 和 LP₁₁ 两个线偏振模式。图 1(a) 给出了 LP₀₁ 和 LP₁₁ 两个模式的有效折射率随波长的变化情况, 在 950~1100 nm 波长范围内, LP₀₁ 和 LP₁₁ 的有效折射率随波长的增加而线性减小, 图中的两幅插图分别对应 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的模式场分布。LPG 的周期与谐振波长的关系式为

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\text{res}}}{n_{\text{eff,A}} - n_{\text{eff,B}}}, \quad (1)$$

式中: Λ 为 LPG 的周期; λ_{res} 为谐振波长; $n_{\text{eff,A}}$ 和 $n_{\text{eff,B}}$ 分别为 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的有效折射率。图 1(b) 给出了计算得出的 LPG 周期随波长的变化情况, 其结果呈抛物线形的非单调变化趋势。随着波长增加, LPG 的周期先减小, 并在 1020 nm 波长附近达到最小周期值 434.7 μm, 随后逐渐增大。也就是说, 当选取 434.7 μm 作为 LPG 的周期时, 仅存在一个谐振波长, 即临界波长。当 LPG 的周期大于 434.7 μm 时, 会对应两个谐振波长, 即少模光纤两个纤芯模式 LP₀₁ 和 LP₁₁ 之间的双峰耦合现象。根据少模光纤 LPG 耦合模理论, 同向传输的 A、B 模式 (对应 LP₀₁ 和 LP₁₁) 的振幅满足

$$A(z) = \exp(-i\delta z) \left(\cos \gamma z + \frac{i\delta}{\gamma} \sin \gamma z \right), \quad (2)$$

$$B(z) = \exp(+i\delta z) \frac{-i\kappa}{\gamma} \sin \gamma z, \quad (3)$$

式中: δ 为相位失配量; κ 为耦合系数; $\gamma = \sqrt{\kappa\kappa^* + \delta^2}$ 。考虑到耦合系数随波长变化很小, 当 LPG 满足相位匹配时, 其光栅长度 $L_c = \pi / (2|\kappa|)$, 可以得出 LP₀₁ 的功率为

$$P_A(z) = |A(z)|^2 = 1 - \frac{\pi^2}{\pi^2 + 4L_c^2\delta^2} \times \sin^2 \left(L_c \sqrt{\frac{\pi^2}{4L_c^2} + \delta^2} \right). \quad (4)$$

随后使用 Matlab 进行数值模拟, 由图 1(c) 可见, 选取光栅周期为 437.5 μm 时的光栅透射谱, 两个谐振峰的位置分别出现在 942 nm 和 1094 nm 处, 不同的光栅周期对应不同的双峰位置。

根据少模光纤 LPG 相位匹配关系, 可以得出温度 (T) 和应力 (ϵ) 的波长漂移灵敏度^[14]:

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} = \left(\frac{dn_{\text{eff,A}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff,B}}}{dT} \right) \Lambda + (n_{\text{eff,A}} - n_{\text{eff,B}}) \frac{d\Lambda}{dT}, \quad (5)$$

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\epsilon} = \left(\frac{dn_{\text{eff,A}}}{d\epsilon} - \frac{dn_{\text{eff,B}}}{d\epsilon} \right) \Lambda + (n_{\text{eff,A}} - n_{\text{eff,B}}) \frac{d\Lambda}{d\epsilon}. \quad (6)$$

温度灵敏度可表示为

$$d\Lambda/dT = \alpha \cdot \Lambda, \quad (7)$$

$$dn_{\text{eff,A}}/dT = \xi n_{\text{eff,A}}, \quad (8)$$

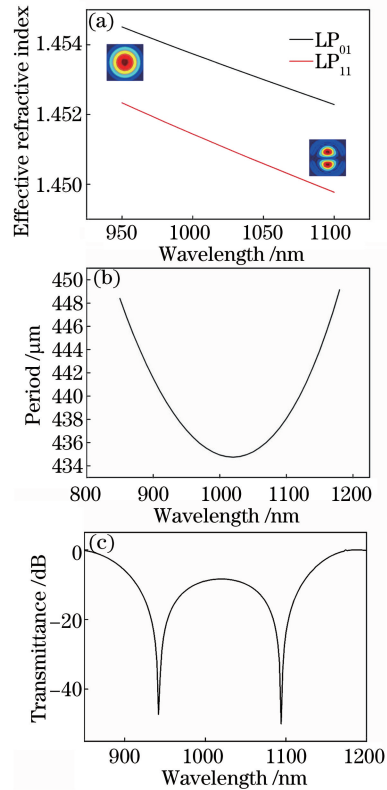


图 1 (a) LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的有效折射率随波长的变化, 插图为 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的模式场; (b) LPG 的周期随波长的变化; (c) 光栅周期为 437.5 μm 时 LPG 的透射谱
Fig. 1 (a) Effective refractive index of LP₀₁ and LP₁₁ modes as a function of wavelength, the insets are the mode fields of LP₀₁ and LP₁₁ modes; (b) grating period of LPG as a function of wavelength; (c) transmission spectrum of LPG with the grating period of 437.5 μm

$$dn_{\text{eff},B}/dT = \xi n_{\text{eff},B}, \quad (9)$$

式中： α 为光纤材料的热膨胀系数； ξ 为纤芯热光系数^[15]。根据光纤折射率随温度的变化^[16]，重新定义了升温 50 °C 之后光纤包层和纤芯的折射率，使用 COMSOL 计算出升温后 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的有效折射率。图 2 为施加的轴向应力和温度改变后的 LPG 透射谱，其中蓝线对应模拟出的升温 50 °C 后的 LPG 透射谱，温度的提升使两个谐振峰分别向不同方向漂移，短波谐振峰向短波方向漂移，长波谐振峰向长波方向漂移。

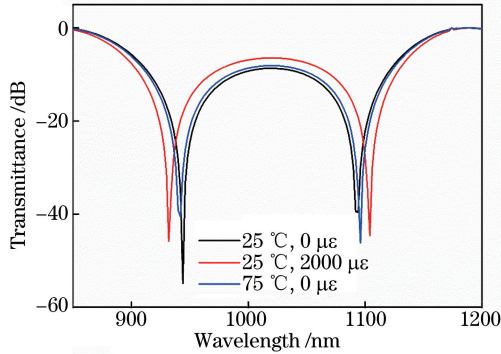


图 2 施加轴向应力和温度改变后的 LPG 透射谱
Fig. 2 Transmission spectra of LPG with the change of applied axial strain and temperature

应力灵敏度可表示为

$$d\Delta = \Delta \cdot d\epsilon, \quad (10)$$

$$dn_{\text{eff},A}/d\epsilon = \eta n_{\text{eff},A}, \quad (11)$$

$$dn_{\text{eff},B}/d\epsilon = \eta n_{\text{eff},B}, \quad (12)$$

式中： η 为纤芯弹光系数。LP₀₁ 和 LP₁₁ 都是少模光纤中的纤芯模式，其有效折射率差随外界施加轴向应力变化不大，轴向应力主要影响光栅的栅格长度，从而改变 LPG 的透射谱。图 2 中红线表示 LPG 施加 2000 $\mu\epsilon$ 应力之后的透射谱，与温度增大时透射谱变化趋势相同，LPG 施加轴向应力也会使双峰向不同方向漂移。鉴于两个谐振耦合峰随着温度或应变的增加向相反的波段漂移，本研究设计出一种具有更高传感灵敏度、折射率不敏感的温度、应变双参量传感器。

3 基于双谐振耦合 LPG 的双参量传感器

3.1 写制双谐振耦合 LPG

CO₂ 激光器写制 LPG 的实验装置如图 3 所示，图中的黑线和黄线分别代表 980 nm 附近的二模光纤 SMF-28e 和单模光纤 Hi-1060。光源选择波长覆盖 600~1700 nm 的超连续光源(SCS)，由于两种光纤的熔接会在二模光纤中激起少量的 LP₁₁ 模式，从

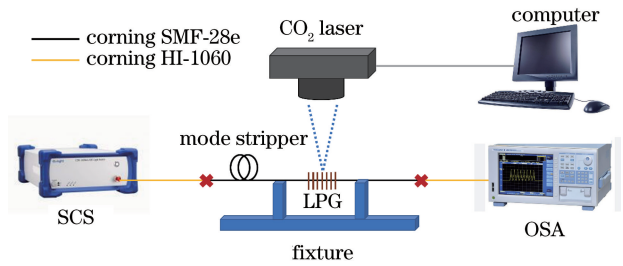


图 3 CO₂ 激光器写制 LPG 实验装置图

Fig. 3 Experiment setup of fabricating the LPG with a CO₂ laser

而影响光栅透射谱的稳定性，本研究采用绕模^[15]的方法过滤掉因熔接而激发的高阶模。为了将 LPG 转化的 LP₁₁ 模式完全损耗，从而测量 LP₀₁ 模式的透射谱，将二模光纤的另一端熔接 Hi-1060 光纤再接入光谱仪(OSA)。CO₂ 激光器(额定功率 20 W)发射激光向二模光纤的一侧辐射，通过破坏其物理结构使折射率呈非对称结构分布^[17]，从而可以实现 LPG 纤芯基模向高阶模式的耦合。使用输出功率为额定功率 7% 的 CO₂ 激光光束，选取 30 个周期，周期为 458 μm ，写制 12 次得到了具有双峰谐振现象的少模光纤 LPG，其双峰分别位于 904.1 nm 和 1131.5 nm。

3.2 温度传感

不同温度下 LPG 的透射谱如图 4 所示，选取的温度范围为 30~90 °C，温度间隔为 10 °C。随着温度的提高，两个谐振峰呈不同的漂移趋势。其中，短波段的谐振峰向短波方向移动，长波段的谐振峰向长波方向移动。图 5(a)、(b)分别对应两个峰波长漂移随温度的变化情况。波长漂移量与温度变化成线性相关，两个峰的温度灵敏度分别为 -0.01756 nm/°C 和 0.10071 nm/°C，双峰漂移总温度灵敏度为 0.11827 nm/°C，其中长波段谐振峰灵敏度高于短波段谐振峰。

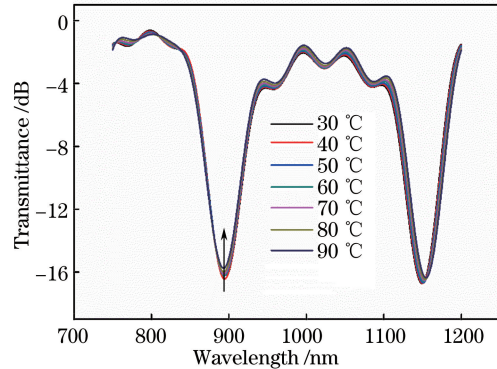


图 4 不同温度下的 LPG 透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of LPG at different temperatures

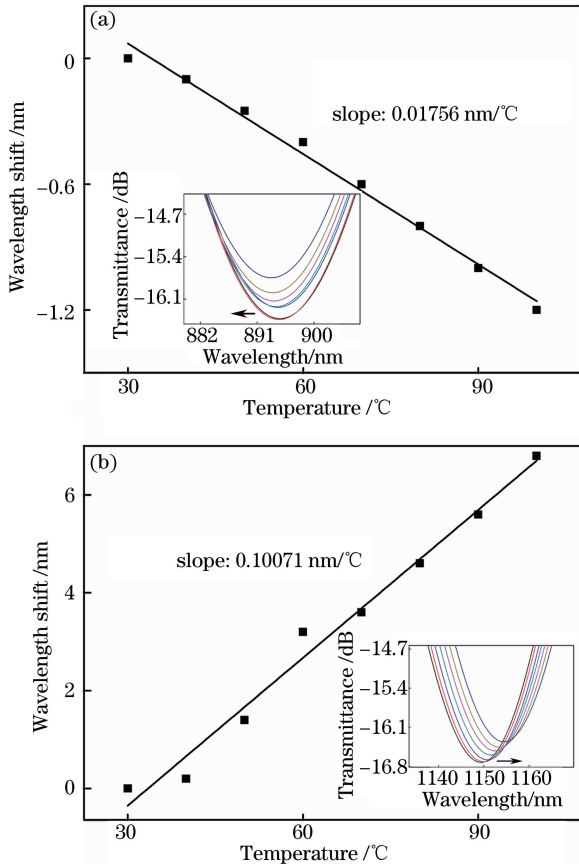


图 5 不同温度下两个谐振峰的波长漂移量。
(a) 第一个; (b) 第二个

Fig. 5 Wavelength shifts of the two resonance dips at different temperatures. (a) The first one; (b) the second one

3.3 应力传感

不同应力下的 LPG 透射谱如图 6 所示。随着施加轴向应力的增大,两个谐振峰朝相反的方向移动,短波段的谐振峰向短波段移动,长波段的谐振峰向长波段移动。图 7(a)、(b)分别给出了双谐振峰的波长漂移量与施加微应力的关系,应力灵敏度分别为 $-1.9 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $3.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$,相比于短波段的谐振峰,长波段的谐振峰有更高的应力灵敏度。双峰不同的漂移方向使总应力灵敏度提高到 $5.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

3.4 温度、应变双参量传感

当温度和应变同时发生变化时,根据 $\Delta\lambda_1 = K_{T1}\Delta T + K_{\epsilon1}\Delta\epsilon$ 和 $\Delta\lambda_2 = K_{T2}\Delta T + K_{\epsilon2}\Delta\epsilon$ ($\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 表示两个谐振峰的波长漂移量, K_T 和 K_ϵ 表示温度和应变灵敏度, ΔT 和 $\Delta\epsilon$ 表示温度和应变的变化量),LPG 的谐振波长会发生漂移。从而可以得出一个灵敏度矩阵:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\epsilon1} \\ K_{T2} & K_{\epsilon2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}. \quad (10)$$

将图 5 和图 7 中的实验数据代入,可以得出双

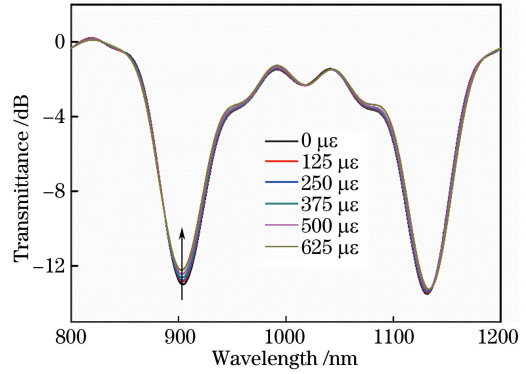


图 6 不同微应力下的 LPG 透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum of LPG at different micro strains

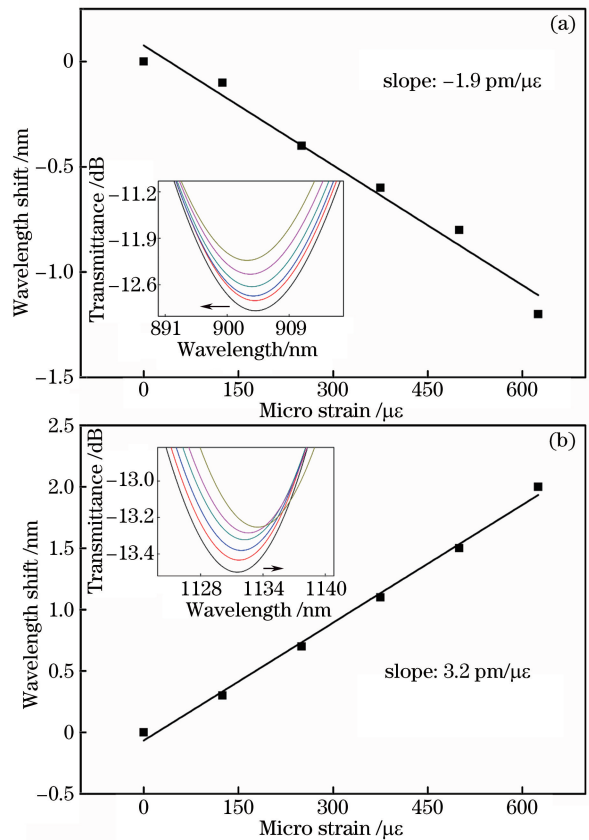


图 7 不同微应力下两个谐振峰的波长漂移量。

(a) 第一个; (b) 第二个

Fig. 7 Wavelength shifts of the two resonance dips at different micro strains. (a) The first one; (b) the second one
峰的温度和应变灵敏度系数

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01756 & -0.0019 \\ 0.10071 & 0.0032 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:波长漂移为纳米量级;温度和应变单位分别为 $^\circ\text{C}$ 和 $\mu\epsilon$ 。增加总波长漂移量后传感灵敏度提高。少模光纤 LPG 两纤芯模耦合双参量传感器的温度和应变灵敏度分别为 $0.11827 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $5.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$,

相比于纤芯模与包层模耦合的普通 LPG^[18] 有更高的灵敏度,其折射率不敏感特性使其可在外界折射率变化较大的环境中进行温度和应变传感。

4 结 论

理论分析了在少模光纤中写制的纤芯 LP₀₁ 模式向纤芯 LP₁₁ 模式耦合的 LPG 中的双谐振耦合现象,并通过 CO₂ 激光器写制 LPG,实验成功地实现了少模光纤 LPG 的双峰耦合。基于两个谐振耦合峰随着温度或应变的增加向相反的波段漂移,设计了温度、应变双参量传感器。该传感器利用两个纤芯模式间的双峰耦合效应,提高了传感灵敏度,与传统的基于纤芯基模与包层模耦合的 LPG 传感器相比,该传感器具有折射率不敏感、光谱稳定、灵敏度高等优势,可以在外界折射率变化较大的环境中进行温度和应变传感。通过改变 LPG 周期可以将双峰位置移动到更靠近临界波长的位置,从而有望获得更高的传感灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Li D M, Chen J, Ge H L, *et al.* Water sound sensor using the optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0506001.
李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅水声传感器 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506001.
- [2] Liu F, Ma W L, Guo X. Study on radial pressure sensing characteristics of EVA sensitivity enhanced fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006001.
刘丰, 马文龙, 郭璇. EVA 增敏的光纤光栅径向压力传感特性研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006001.
- [3] Luo B B, Wu S X, Wang L L, *et al.* Newcastle disease virus immunosensor based on 81° tilted fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1106001.
罗彬彬, 吴胜昔, 王玲玲, 等. 基于 81° 倾斜光纤光栅的新城疫病毒免疫传感器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1106001.
- [4] Wang J Y, Tong Z R, Yang X F, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long period fiber grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0905003.
王洁玉, 童嵘嵘, 杨秀峰, 等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905003.
- [5] Shu X W, Zhu X M, Jiang S, *et al.* High sensitivity of dual resonant peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(18): 1580-1581.
- [6] Shu X W, Huang D. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- μm -period fiber grating [J]. *Optics Communications*, 1999, 171(1/2/3): 65-69.
- [7] Gu Z T, Deng C L. Application and development of coated fiber grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1317-1326.
顾铮先, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展 [J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1317-1326.
- [8] Lam C C C, Mandampambil R, Sun T, *et al.* Optical fiber refractive index sensor for chloride ion monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(5): 525-532.
- [9] Fu H, Shu X, Zhang A, *et al.* Implementation and characterization of liquid-level sensor based on a long-period fiber grating Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(11): 2878-2882.
- [10] Konstantaki M, Pissadakis S, Pispas S, *et al.* Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly(ethylene oxide)/cobalt chloride coating [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(19): 4567-4571.
- [11] Corres J M, del Villar I, Matias I R, *et al.* Fiber-optic pH-sensors in long-period fiber gratings using electrostatic self-assembly [J]. *Optics Letters*, 2006, 32(1): 29-31.
- [12] Gu Z T, Zhang J T. Metal-coated long-period fiber grating liquid sensor based on dual-peak resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0305003.
顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0305003.
- [13] Garg R, Tripathi S M, Thyagarajan K, *et al.* Long period fiber grating based temperature-compensated high performance sensor for bio-chemical sensing applications [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 176: 1121-1127.
- [14] Xu J B, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Simultaneous force and temperature measurement using long-period grating written on the joint of a microstructured optical fiber and a single mode fiber [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 492-496.
- [15] Zhang Z R, Zhang G M, Zhang X P. Strain and temperature sensitivities of long period fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 103-106.
张志荣, 张冠茂, 张晓萍. 长周期光纤光栅应变和温

- 度传感灵敏度研究[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 103-106.
- [16] Cai C P. Dependent factor of refractive index in fibers [J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(5): 13-18. 蔡春平. 光纤折射率的依赖因素[J]. 应用光学, 2000, 21(5): 13-18.
- [17] Han Y, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Controllable all-fiber generation/conversion of circularly polarized orbital angular momentum beams using long period fiber gratings[J]. Nanophotonics, 2018, 7(1): 287-293.
- [18] Dong J L, Chiang K S. Temperature-insensitive mode converters with CO₂-laser written long-period fiber gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(9): 1006-1009.