

DOI:10.16136/j.joel.2022.08.0057

基于逐点法刻写的偏芯光纤布拉格光栅应变和温度传感研究

田 晨¹, 陈海滨^{1,2*}, 胡 锴^{1,2}, 张军英^{1,2} 王 伟^{1,2}

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘要:为解决当前光纤光栅制备灵活性较低,以及测量中不利于实现分布式波分复用的问题,提出了一种基于逐点法刻写的偏芯光纤布拉格光栅传感器(eccentric fiber Bragg grating, EFBG)。采用飞秒激光(femtosecond laser, FSL)逐点刻写技术,光栅刻写位置垂直偏离光纤中心 $3\ \mu\text{m}$,光栅长度为 $5\ \text{mm}$,光栅中心波长为 $1633\ \text{nm}$ 。不同于传统光纤光栅,偏芯结构的光栅可以激发出较宽的包层模共振范围,通过分析包层模共振峰的波长漂移量,表征施加的应变大小或温度高低。实验结果表明,应变测量范围在 $0\sim 500\ \mu\epsilon$ 时,包层模灵敏度为 $0.98\ \text{pm}/\mu\epsilon$,温度测量范围在 $30\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 时,包层模灵敏度为 $10.89\ \text{pm}/^\circ\text{C}$,并且包层模灵敏度相比芯模灵敏度数值相差较小,从而可以实现应变或温度的传感测量。

关键词: 光纤传感器; 光纤布拉格光栅; 包层模; 应变; 温度

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)08-0865-06

Research on strain and temperature sensing of eccentric fiber Bragg grating based on point-by-point method

TIAN Chen¹, CHEN Haibin^{1,2*}, HU Kai^{1,2}, ZHANG Junying^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

2. Shaanxi Province Key Lab of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: To solve the problems of low flexibility of fiber grating preparation, and not conducive to the realization of distributed wavelength division multiplexing in measurement, an eccentric fiber Bragg grating (EFBG) sensor based on point-by-point method was proposed. Using the technology of point-by-point method with femtosecond laser (FSL), the grating writing position is vertical deviation from the center by $3\ \mu\text{m}$, the length of the grating is $5\ \text{mm}$, the center wavelength of the grating is $1633\ \text{nm}$. Different from traditional fiber Bragg grating (FBG), the eccentric structure of the grating can excite a wider range of cladding mode resonance. By analyzing the wavelength drift of the cladding mode resonance peak, the applied strain or temperature can be characterized. The experimental results show that in the strain measurement range of $0\sim 500\ \mu\epsilon$, the sensitivity of cladding mode is $0.98\ \text{pm}/\mu\epsilon$, and in the temperature measurement range of $30\sim 80\ ^\circ\text{C}$, the sensitivity of cladding mode is $10.89\ \text{pm}/^\circ\text{C}$. Besides, the difference between cladding mode sensitivity and core mode sensitivity is small, so the sensor measurement of strain or temperature can be realized.

Key words: fiber-optic sensor; fiber Bragg grating (FBG); cladding mode; strain; temperature

* E-mail: chenhaibin@xatu.edu.cn

收稿日期: 2022-01-23 修订日期: 2022-03-09

基金项目: 陕西省教育厅重点科学研究计划(20JS060)和陕西省自然科学基金研究计划(2021JM-438)资助项目

1 引 言

应变作为多种门类工程结构健康监测的核心参数之一,在航天航海、桥梁隧道、水利电力、石油平台、土木工程、船舶等多个领域受到了广泛的关注^[1]。在隧道健康诊断中,应变传感技术可以对隧道的沉降进行监测^[2];在机器人技术中,应变测量技术已经用于机械手的触觉感知控制领域^[3];在飞行航天领域,应变测量技术可以解决飞机结构大量程应变监测问题^[4]。传统的传感测量易受到外界干扰,不适合恶劣条件下的测量^[5]。

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为应变传感领域中的重要结构,具有响应灵敏度高、尺寸小、耐腐蚀、抗电磁干扰、易于组网复用等诸多优点。目前在其结构基础上,已经研制出了长周期光纤光栅(long-period grating, LPG)传感器^[6]和倾斜光纤布拉格光栅(tilted fiber Bragg grating, TFBG)传感器^[7],类似结构的传感器已经可以实现对应变、温度等物理量的测量。REN等^[8]使用CO₂激光源周期性地刻蚀标准单模光纤(single mode fiber, SMF),制备了一种微锥形长周期光纤光栅(microtapered long-period gratings, MTLPG),并通过实验研究得到该结构传感器透射谐振波长的应变灵敏度为1.2 pm/ $\mu\epsilon$; DONG等^[9]利用铂纳米颗粒涂层包裹LPG制成温度传感器,使其温度灵敏度达到103.43 pm/ $^{\circ}\text{C}$;覃荷瑛等^[10]通过螺旋倾斜式光纤光栅传感器监测钢绞线应变,实现光纤光栅在小拉力的情况下对大应变的测量。上述结构传感器在测量物理量时可以达到较高灵敏度,但其所激发的包层模共振能量较低且带宽较宽,不利于实现分布式的波分复用,限制了传感器的动态测量范围。并且传统制备光纤光栅所使用的相位掩膜技术,虽然相较于全息干涉法大幅降低了对光源相干性的要求,提高了光栅的制备效率,但仍具有制备灵活性较低的缺点。

为解决上述问题,本文提出了一种基于逐点法刻写的偏芯光纤布拉格光栅传感器(eccentric fiber Bragg grating, EFBG)传感器。该传感结构的栅区靠近光纤包层,可以激发出较宽的包层模共振范围;使用逐点法进行 EFBG 的刻写,提高了制备的灵活性,可根据需求自由地调整布拉格光栅的参数,并且不需要额外载氢便可以直接在 SMF 上进行刻栅^[11]。当 EFBG 受到轴向应变作用,光栅的周期和有效折射率会发生改变,进而改变模式之间的耦合,通过测量反射光谱中波长漂移量可以表征不同应变或温度等物理量的大小^[12]。

使用该 EFBG 的包层模进行传感测量,具有良好的响应性,且制备工艺比较灵活,在光纤传感领域中具有良好的潜力。

2 EFBG 的制备和结构

EFBG 的制作过程如图 1 所示,使用飞秒激光器(femtosecond laser, FSL)作为输出光源进行光栅刻写。激光出射经过衰减片减弱强度,经由反射镜反射后再由柱透镜进行汇聚,聚焦于光纤裸纤上方。光纤夹持器放置于精密电控线性位移平台上。光纤(标准通信光纤 SMF-28)的一端预先剥去涂覆层连接跳线,使用光纤夹持器进行固定。将跳线一端连接至光学环行器 2 端口,环行器 1 端口接宽带光源(broadband light source, BLS), 3 端口接光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)。采用逐点法进行偏芯光栅刻写,刻写过程中通过显微物镜观测出射到光纤上的激光光束。精密电控线性位移平台的移动速度为 328.2 $\mu\text{m/s}$,通过设置调整位移平台位置使激光光束(单脉冲能量为 200 nJ、重复频率为 200 Hz)聚焦在 SMF 裸纤之上,其会自动精确地移动使激光在离光纤纤芯中心垂直偏移 3 μm 的位置进行等间距的水平刻写。最终刻写的偏芯光纤光栅的长度为 5 mm,光栅的中心波长为 1 633 nm。

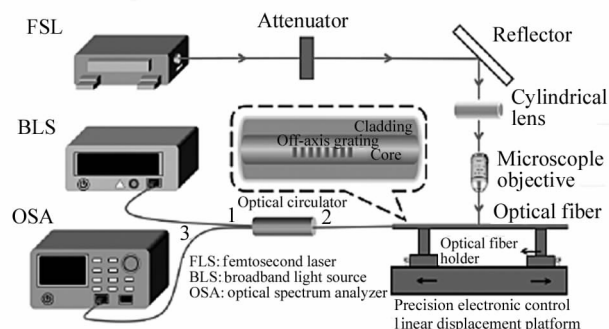


图 1 EFBG 传感器的制作过程

Fig. 1 Fabrication process of EFBG sensor

图 2 为所制成的 EFBG 显微结构图。传统 FBG 的传输模式是前向传输的纤芯基模与后向传输基模发生的耦合,进而在光谱中产生 Bragg 谐振峰。而 EFBG 在刻写的过程中由于激光光束中心偏离光纤纤芯,纤芯部分敏感区域受到激光照射产生折射率调制,折射率调制大小沿激光衍射斑的高度呈非对称分布,导致其谐振光谱发生改变。同时由于栅区偏离光纤中心位置靠近包层,耦合至包层模的能量显著增加,激发出一系列包层模的共振峰,这些共振峰对折射率敏感^[13],会受到应变、温度和曲率等因素调制。

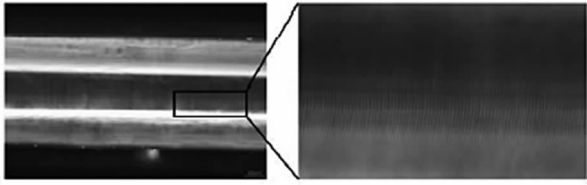


图2 EFBG 传感结构显微结构图

Fig. 2 Micrograph of EFBG sensing structure

3 应变和温度测量原理

使用该传感器对应变进行测量,在 EFBG 的一端施加应变拉力,如图 3 所示。光纤因弹性变形在轴向方向上被拉长,光栅周期 Λ 随之发生改变,同时由于光纤轴向上机械应变产生弹光效应,使光纤有效折射率 n_{eff} 发生相应的变化。

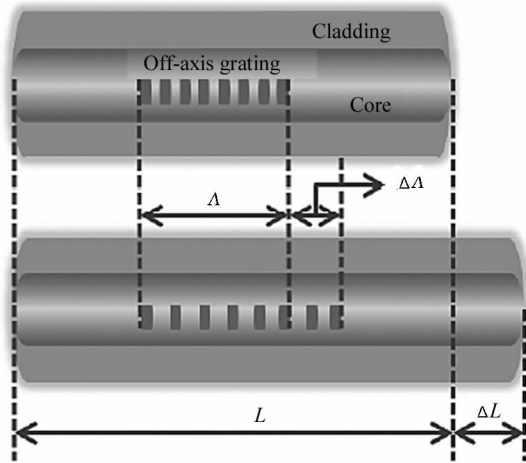


图3 EFBG 传感器轴向拉伸应变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of EFBG sensor axial strain

EFBG 反射光谱的中心波长 λ_B 、纤芯有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 之间的关系满足光纤布拉格方程,在施加应变 ϵ 之后波长的偏移量为:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda \cdot \Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda. \quad (1)$$

当光纤受到拉伸,应变的大小在线性弹性的范围内时,光纤长度增加的比例和光栅周期增大的比例相同,结合微应变计算式可知:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}. \quad (2)$$

由弹光效应可知,应变 ϵ 所导致的光纤有效折射率的变化为^[14]:

$$\Delta n_{\text{eff}} = -\left(\frac{n_{\text{eff}}^3}{2}\right)(p_{12} - \nu p_{12} - \nu p_{11}) \frac{\Delta L}{L}, \quad (3)$$

式中, p_{ij} 为弹光张量的分量($i, j = 1, 2$), ν 为泊松比,石英材料的泊松比 $\nu = 0.16$ 。联立上述式(1)~(3),求得轴向应变引起的波长漂移式如下所示:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot \left[1 - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2}\right)(p_{12} - \nu p_{12} - \nu p_{11})\right] \cdot \frac{\Delta L}{L}. \quad (4)$$

同时传感器还对温度敏感,不同温度 T 下产生的热膨胀效应和热光效应也会引起波长的漂移,其中由热膨胀效应引起光栅周期 Λ 的变化为^[15]:

$$\Delta\Lambda = \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \cdot \Delta T \cdot \Lambda = a \cdot \Delta T \cdot \Lambda, \quad (5)$$

式中, $\frac{\partial\Lambda}{\partial T}$ 代表光纤的热膨胀系数,用 a 表示。由热光效应导致的光纤有效折射率 Δn_{eff} 的变化为:

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \cdot \Delta T \cdot n_{\text{eff}} = \zeta \cdot \Delta T \cdot n_{\text{eff}}, \quad (6)$$

式中, $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ 代表光纤光栅折射率温度系数,用 ζ 表示;将式(5)、式(6)代入式(1),求得由温度引起的波长漂移量,如下式所示:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot \Delta T \cdot (a + \zeta). \quad (7)$$

通过上述分析可知:当 EFBG 受到轴向应变和温度作用,均会使波长发生漂移,可以通过反射调制光谱的波长漂移量表征应变和温度等物理量。

4 实验分析与讨论

为了验证 EFBG 传感器对应变的响应能力,对提出和制作的传感器进行性能测试。如图 4 所示,该系统由 SLD (super luminescent diode) 光源 (S5FC1550S-A2, Thorlabs, USA, 中心波长: 1 568 nm, 3 dB 带宽: 90 nm)、OSA (AQ6370D, Yokogawa, Japan, 光谱测量范围: 600—1 700 nm, 最高分辨率: 0.02 nm, 宽动态范围: 70 dB)、光纤环行器和两个调节架组成。需要保证施加应变的方向和传感器的轴向方向重合,实验前调节两个调节架的垂直升降台,使两个光纤夹具处于同一水平面。旋转两个调节架的螺旋齿增加间距对传感器施加轴向拉伸应变。为了消除温度对实验的干扰,实验时应使环境温度保持在室温 15 °C。

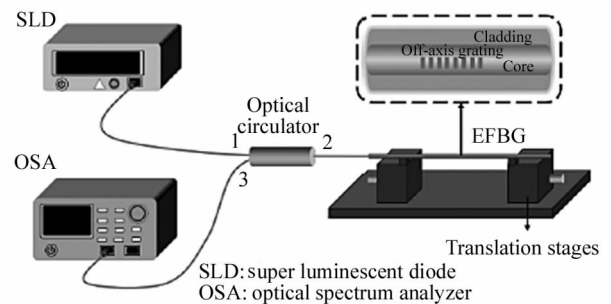


图4 EFBG 应变传感器系统简图

Fig. 4 Experimental setup of EFBG strain sensing system

SLD 输出的光信号从光纤环行器的 1 端口输入,从 2 端口出射到 EFBG 应变传感器内,携带着应变大小波长信息的反射光从环形器的 3 端口出射到 OSA。螺旋齿每向外旋转一格间距增加 $10\ \mu\text{m}$,旋转一圈可以增加 $500\ \mu\text{m}$ 的间距。调节两个光纤夹具之间的初始间隔为 $200\ \text{mm}$,将传感器的两端分别放置于两边夹具上,使用紫外胶固定,使光纤处于刚好绷直的状态。由应变式(2)可知,间距每增加 $20\ \mu\text{m}$ 应变会增加 $100\ \mu\epsilon$ 。在拉伸范围为 $0\sim 500\ \mu\epsilon$,间隔为 $100\ \mu\epsilon$ 的测试下,该传感器的反射调制光谱如图 5 所示。

从图 5 可知,传感器的反射光谱对不同大小的应变具有明显的响应,相比于传统 FBG,EFBG 可以

激发更多的包层模,并且这些包层模随着应变的增加其反射光谱也出现波长红移现象。本文选用波长为 $1610\ \text{nm}$ 处附近的谐振峰作为包层模的特征波长,并选用波长为 $1633\ \text{nm}$ 处附近的 Bragg 谐振峰作为纤芯模的特征波长进行比对。测试结果表明:随着应变增加到 $500\ \mu\epsilon$,包层模共振波长漂移了 $0.476\ \text{nm}$,纤芯模共振波长漂移了 $0.48\ \text{nm}$,漂移波长大小无明显差异。可以推测光栅周期 Λ 和有效折射率 Δn_{eff} 在拉伸过程中的变化,对包层模和纤芯模的应变灵敏度产生的影响相同。通过线性拟合,发现包层模的应变灵敏度为 $0.98\ \text{pm}/\mu\epsilon$,线性度 R^2 为 0.98415 ;纤芯模的应变灵敏度为 $0.99\ \text{pm}/\mu\epsilon$,线性度 R^2 为 0.97985 。

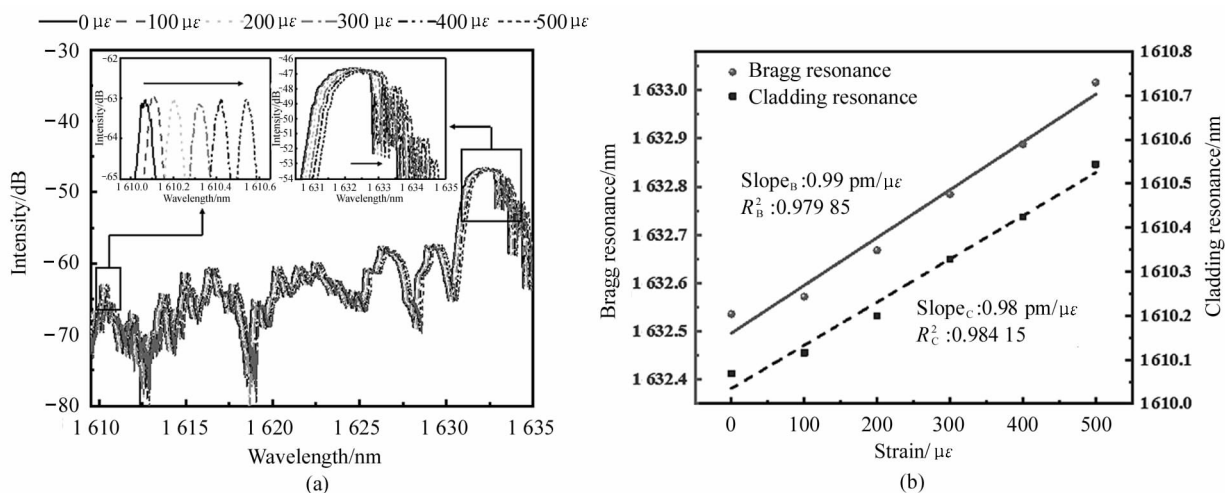


图 5 不同应变条件下 EFBG 传感器光谱:(a) 反射调制光谱;(b) 应变敏感特性

Fig. 5 Spectrum of the EFBG sensor under different strains:

(a) Reflection spectrum evolution; (b) Strain sensitivity of the resonance feature

由于 EFBG 还对温度敏感,因此对温度响应进行了研究。实验中将传感器固定在加热平台上,以

$10\ ^\circ\text{C}$ 为步长记录 $30\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 下的反射光谱图,结果见图 6。从实验数据可得,随着温度升高,包层模共振

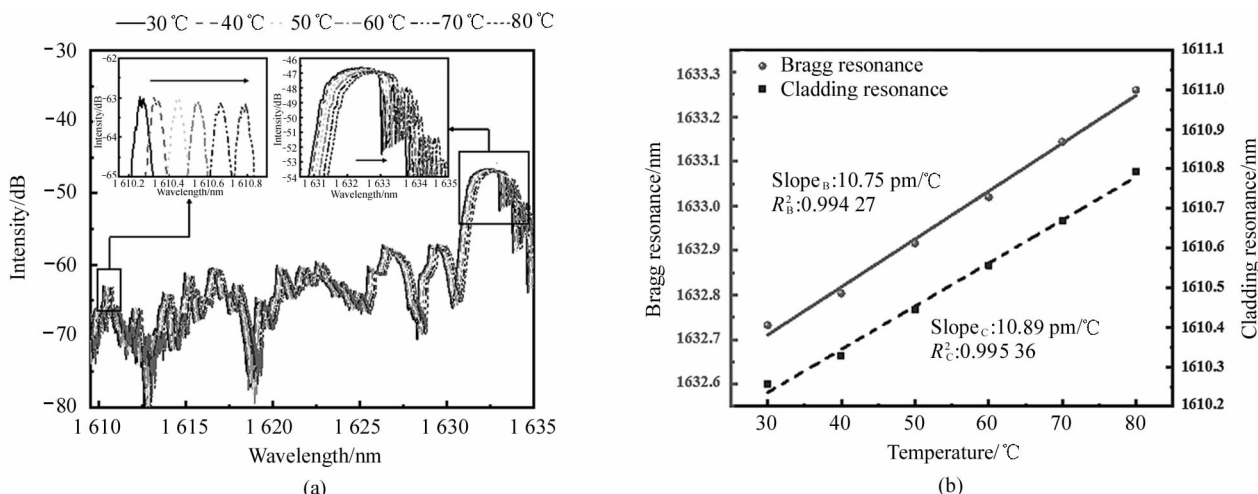


图 6 不同温度条件下 EFBG 传感器光谱:(a) 反射调制光谱;(b) 温度敏感特性

Fig. 6 Spectrum of the EFBG sensor under different temperatures:(a) Reflection spectrum evolution;

(b) Temperature sensitivity of the resonance feature

波长漂移了 0.536 nm, 纤芯模共振波长漂移了 0.528 nm。同理推测随温度递增, 热膨胀效应和热光效应引起的光栅周期 Δ 和有效折射率 Δn_{eff} 的变化对包层模和纤芯模的温度灵敏度也具有相同的影响。通过线性拟合, 发现包层模的温度灵敏度为 10.89 pm/°C, 线性度 R^2 为 0.99536; 纤芯模的温度灵敏度为 10.75 pm/°C, 线性度 R^2 为 0.99427。

通过分析传感器的反射光谱信号, 可以分别实现应变和温度的测量。从反射光谱中可以看出, 该 EFBG 传感器由于其独特的光栅结构, 会在反射光谱中产生多个包层共振峰。通过选用 1610 nm 波长处附近的包层共振峰对应变和温度分别进行测量, 测试结果表明其响应度良好, 对比纤芯模二者应变灵敏度差异小于 0.02 pm/ $\mu\epsilon$, 温度灵敏度差异小于 0.15 pm/°C, 因此可以使用该 EFBG 反射光谱包层模的波长漂移来表征不同应变和温度。另外, 由于该传感器的温度灵敏度是应变灵敏度的 10 倍左右, 在测量应变时会对测试结果产生不利影响, 因此在实际测量中, 应给传感器创造一个恒温环境, 避免温度交叉敏感对结果产生影响变化。

5 结 论

本文提出并制备了一种新型的基于 FSL 逐点刻写的 EFBG 传感器, 并利用此传感器对应变和温度响应进行了实验探究。结果表明, 在 0—500 $\mu\epsilon$ 的应变范围内, 包层模应变灵敏度为 0.98 pm/ $\mu\epsilon$, 线性度 R^2 为 0.98415; 在 30—80 °C 范围内, 包层模温度灵敏度为 10.89 pm/°C, 线性度 R^2 为 0.99536。通过实验证明了使用 FSL 逐点刻写的 EFBG 传感器具有良好的响应性和稳定性, 可用于应变和温度等不同物理量的测量, 光栅结构紧凑简单, 制作成本低, 并且光栅的制备可以根据需求灵活调整参数, 实际应用性强。

参考文献:

- [1] SHEN J X, WANG W, ZHANG J Y, et al. Hybrid temperature and strain dual-parameter sensor based on fiber Bragg grating and multi-mode interference of hollow-core fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0506006.
申佳鑫, 王伟, 张军英, 等. 光纤布拉格光栅与空芯光纤多模干涉混合型温度应变双参量传感器[J]. *光子学报*, 2021, 50(5): 0506006.
- [2] HOU G Y, LI Z X, HU T, et al. Study of tunnel settlement monitoring based on distributed optic fiber strain sensing technology [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 3148-3158.
- [3] MASSARI L, ODDO C M, SINIBALDI E, et al. Tactile sensing and control of robotic manipulator integrating fiber Bragg grating strain-sensor [J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2019, 13: 8.
- [4] YAN G, LU J Z, ZHANG K Y, et al. Temperature decoupling large range fiber Bragg grating strain sensor [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(5): 1682-1688.
闫光, 卢建中, 张开宇, 等. 温度解耦大量程光纤光栅应变传感器[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(5): 1682-1688.
- [5] LI H, GUO Z L, YANG W T, et al. Research of the liquid level sensing technology based on a hollow fiber multimode interference optical fiber [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(1): 120-124.
李虎, 郭子龙, 杨文婷, 等. 空芯光纤多模干涉型光纤液位传感技术研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(1): 120-124.
- [6] JIANG L Q, HU Y H, JIANG C, et al. A novel strain sensor by long period fiber gratings [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(7): 21-23.
江柳清, 胡义慧, 江超, 等. 一种新颖的长周期光纤光栅应变传感器[J]. *激光杂志*, 2017, 38(7): 21-23.
- [7] CHENG D, YAN F, FENG T, et al. Single weakly tilted FBG in 2 μm band capable of measuring temperature, axial strain, and surrounding refractive index [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(9): 096107.
- [8] REN K, REN L, LIANG J, et al. Highly strain and bending sensitive microtapered long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(13): 1085-1088.
- [9] DONG X, XIE Z, ZHOU C, et al. Temperature sensitivity enhancement of platinum-nanoparticle-coated long period fiber gratings fabricated by femtosecond laser [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6549-6553.
- [10] QIN H Y, SHEN Q X, ZHONG Y J. Research on monitoring strain of steel strands with fiber Bragg grating sensor setting spirally and slantingly [J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(11): 63-65.
覃荷瑛, 沈全喜, 钟英杰. 螺旋倾斜式光纤光栅传感器监

- 测钢绞线应变方法研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 63-65.
- [11] CHEN X Y, HE J, XU X Z, et al. High-temperature sensor array based on fiber Bragg gratings fabricated by femto-second laser point-by-point method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306002.
- 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306002.
- [12] ZHOU C X, ZENG Q K, QIN Z X, et al. Principle and progress of fiber grating strain-temperature sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(10): 53-58.
- 周春新, 曾庆科, 秦子雄, 等. 光纤光栅应变-温度传感器的原理及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(10): 53-58.
- [13] GAO R, JIANG Y, ABDLAZIZ S. All-fiber magnetic field sensors based on magnetic fluid-filled photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2013, 38(9): 1539-1541.
- [14] BLOCK U L, DIGONNET M J, FEJER M M, et al. Bending-induced birefringence of optical fiber cladding modes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(6): 2336-2339.
- [15] PENG S Y, YUAN X H, ZHANG G Y. Study on temperature and axial strain's sensitivity of optical fiber grating sensors[J]. Study on Optical Communications, 2003(2): 46-48.
- 彭仕玉, 元秀华, 张国云. 光纤光栅传感器温度与轴向应变灵敏度的研究[J]. 光通信研究, 2003(2): 46-48.

作者简介:

陈海滨 (1981—), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事光电探测及光纤传感方面的研究.