

文章编号 2095-1531(2021)05-1224-07

油气井下光纤光栅温度压力传感器

薛兆康¹, 国旗¹, 刘善仁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: 温度和压力是石油开采过程中重要的参数, 但油气井下高温高压环境苛刻, 传统电子传感器很难实现长期稳定的工作。本文提出了一种基于碳纤维管增敏型的光纤光栅温度压力传感器。该传感器是以碳纤维丝编织成的中空管状结构作为骨架, 通过耐高温环氧树脂固化成复合碳纤维管作为弹性体, 并将表面嵌入耐高温光纤布拉格光栅作为感知元件, 实现了井下温度和压力的同时测量。实验结果表明, 该传感器可以在 0~150 °C 和 0~80 MPa 环境下稳定工作, 压力灵敏度最大可达到 -50.02 pm/MPa, 同时表现出很好的线性响应。通过外加参考光栅作为温度补偿光栅, 解决了温度和压力同时测量过程中的交叉敏感问题, 满足了井下开采过程中的精度要求, 为油气井下高温高压光纤传感器的设计提供了实验依据。

关 键 词: 油气井; 碳纤维管; 光纤布拉格光栅; 压力传感器

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0008

Fiber bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well

XUE Zhao-kang¹, GUO Qi¹, LIU Shan-ren¹, 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: Temperature and pressure are very important parameters in oil and gas well exploitation. The downhole environment is harsh so it is difficult for traditional electronic sensors to achieve long-term and stable monitoring of downhole parameters. In this paper, a fiber Bragg grating temperature and pressure sensor based on a carbon-fiber sensitized tube is proposed. The sensor is composed of a hollow tubular structure woven of carbon fibers as a skeleton. The composite carbon fiber tubes are cured by high-temperature resistant epoxy resin as an elastomer, and the high-temperature resistant fiber Bragg grating is embedded on

收稿日期: 2021-01-14; 修訂日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 91860140, No. 61874119, No. 61905244); 吉林省科技发展规划项目 (No. 20180201014GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 91860140, No. 61874119, No. 61905244);
Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20180201014GX)

the surface as a sensing element to realize the simultaneous measurement of downhole temperature and pressure. The experimental results show that the sensor can work stably in environments of 0~150 °C and 0~80 MPa, and the maximum pressure sensitivity can reach -50.02 pm/MPa. The sensor has a good linear response. By adding a reference grating as a temperature compensation grating, the cross-sensitivity problem in the process of the simultaneous measurement of temperature and pressure is solved, and the accuracy requirements in the process of underground mining are met. This technique provides an experimental basis for the design of high-temperature and high-pressure optical fiber sensors in oil and gas wells.

Key words: oil and gas well; carbon fiber tube; fiber bragg grating; pressure sensor

1 引言

石油开采过程中,井下的温度和压力是必不可少的测量参数,这对确定油层位置以及保障开采过程中的安全极为重要^[1]。但随着开采深度的增加,井下的温度和压力也在不断增加,这对传感器的设计和封装提出了巨大挑战。工程实践表明:油气井下温度每升高 18 °C,电子传感器的故障率会增加一倍^[2]。鉴于以上问题,光纤传感器的优势被突显出来。光纤传感器凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀、耐高温、可实现多路复用等优点,被广泛应用于航空航天,石油化工,交通运输等诸多领域^[3-8]。

光纤液压传感器主要可分为法布里-珀罗干涉仪型^[9-11]、微结构光纤型^[12-14]以及光纤光栅增敏型^[15-17]。前两种主要是基于光纤微腔结构,对外部压力敏感,可通过刻蚀^[18]、微加工^[19-20]等方法制作微空隙,再用熔接机放电或二氧化碳激光器熔接的方式制备光纤微腔^[21-22],以及在微结构光纤本身存在空气腔的基础上,对其进行密闭封装^[23-24]。这两种类型的传感器可应用于液压和气压的测量,但很难在高温高压环境下使用,在高压环境下,很容易造成微腔爆裂,同时基于干涉型的传感器,解调方式较复杂,解调精度较低,很难在大测量范围内实现高灵敏度监测。这使得光纤光栅增敏型传感器在高温高压苛刻环境下使用得到了进一步的研究应用。

光纤光栅已被广泛应用于各种苛刻环境下的高温监测,同时光纤光栅可基于波长和强度方式解调,解调方式更灵活^[25-26]。波长解调方式抗干扰性强,不容易受到光源波动影响,对系统稳定性要求较低。对于光纤光栅传感器在油气井下的应用,早在 1993 年 Xu 等人已开展相关研究,通过裸光栅方式测试到最高压强 70 MPa, 灵敏度为

3 pm/MPa, 由于裸光栅压力灵敏度低, 很难在工程中应用^[27]。孙安等人通过特殊聚合物材料将光纤光栅封装在金属管中, 在 40 MPa 的压力范围内灵敏度为 36 pm/MPa^[28]。申人升等人制备了金属薄壁筒式压力传感器, 在 40 MPa 的压力范围内灵敏度系数为 33 pm/MPa^[29]。这些增敏方法都相应地提高了压力灵敏度, 但压力灵敏度提高的过程中, 如何保证传感器能承受更大的压力是值得进一步研究的课题。因此光纤光栅增敏型传感器在油气井环境下的应用也在不断地被研究。

本文提出了一种基于光纤光栅增敏型的压力传感器, 增敏结构采用的是自主设计编织的碳纤维管, 这种结构在保证抗压强度的同时, 也有利于增大液压传感灵敏度。采用参考光栅和压力传感光栅的双光栅结构, 解决了温度和压力传感过程中的交叉敏感问题。实验表明, 该传感器可以在 0~150 °C、0~80 MPa 的液压环境下稳定工作。

2 传感器原理与设计

在油气井下高温高压恶劣环境中, 需要对传感器进行可靠的封装才可以获得稳定的数据。根据应用环境的不同, 对传感器的封装及增敏方式也不尽相同。裸光纤布拉格光栅的温度灵敏度大致在 10 pm/°C, 压力灵敏度小于 3 pm/MPa。为了获得更高的灵敏度, 尤其需要大幅提高压力灵敏度, 因此要对光纤布拉格光栅进行增敏处理。常用的增敏材料主要有金属材料、合金材料、聚合物材料以及热膨胀系数较小的碳纤维复合材料等。在进行压力增敏材料选择上, 本文采用了碳纤维材料, 这样可以减小温度因素带来的较大热膨胀变化, 同时碳纤维具有很好的温度稳定性和很高的强度, 是作为稳定弹性体的理想选择^[30-31]。在增敏结构上, 主要有弹性柱体, 圆平膜片以及悬

臂梁等结构^[32]。本文采用的是中空弹性圆柱体结构,这种结构可以起到很好的增敏效果,同时也具有很高的强度。

图 1 为该光纤温度压力传感器的封装示意图和器件实物图。压力传感器基体是通过三维四向编织的中空碳纤维管,编织选用的材料是碳纤维丝(日本东丽 T700-12K),将碳纤维丝相互编织制成预组件,后加入高温树脂胶与基体挤压固化成型。碳纤维管两端通过不锈钢堵头和高温树脂胶进行封装,形成一个密闭中空结构,管长 10 cm,外径为 2 cm,内径为 1 cm,壁厚 0.5 cm。光纤布拉格光栅区域通过高温树脂胶固定在碳纤维管表面中间位置,作为传感区域,感知外部压力对碳纤维管产生的形变大小。参考光栅与压力传感光栅级联在同一根光纤上,且将参考光栅封装在一段空心管内,仅作为温度补偿光栅感知压力传感器周围的温度。实验中的光纤布拉格光栅是通过飞秒激光逐点法在聚酰亚胺光纤上制备两种不同波长的光栅。压力传感光栅中心波长在 1550 nm 左右,参考光栅中心波长在 1530 nm 左右,这样可以对光栅进行独立解调,而不发生波长串扰。光纤表面聚酰亚胺涂层不仅耐高温,而且耐化学腐蚀,可在 300 °C 高温环境长期稳定工作,非常适合在油气井下苛刻环境中应用。

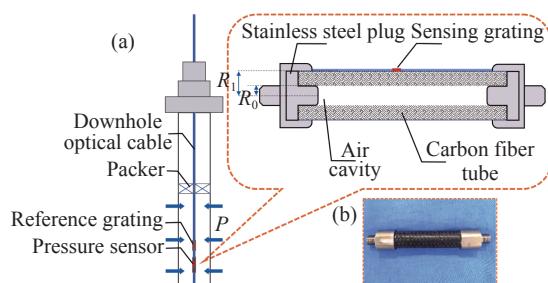


图 1 (a) 光纤温度压力传感器封装示意图和 (b) 封装后的器件图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of optical fiber temperature and pressure sensor packaging and (b) device diagram after packaging

为了更好地分析在外界压力作用下碳纤维管管身的形变和受力情况,通过 COMSOL Multiphysics 软件对碳纤维管进行了建模分析。图 2(彩图见期刊电子版)分别为碳纤维管在 (a) 20 MPa、(b) 40 MPa、(c) 60 MPa 和 (d) 80 MPa 压强下的仿真模型。通过仿真分析可知,当外部压力作用碳纤维管时,管身中心位置形变最大,压力传感光栅

应固定在此位置。

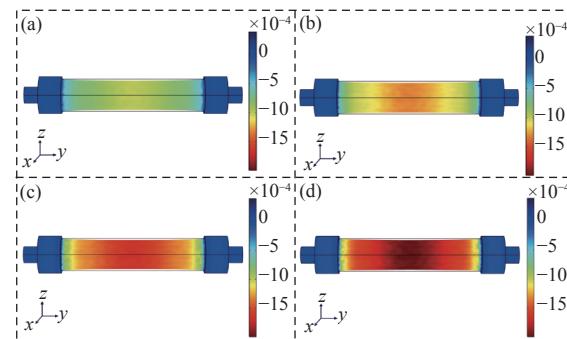


图 2 三维四向法编织碳纤维管受压情况仿真图

Fig. 2 Pressure simulation diagrams of carbon fiber tube prepared by three-dimensional four-way method

当压力传感光栅受轴向应变 ε 和温度 T 共同作用时,中心反射波长 λ_B 的变化为^[33]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha_s + \xi_s)\Delta T \quad , \quad (1)$$

式中: P_e 为光纤的有效弹光系数, α_s 为光纤的热膨胀系数, ξ_s 为光纤的热光系数。

当温度恒定时,由外界压力引起的各向同性应力 P 产生的应变量 ε 可表示为^[32]:

$$\varepsilon = -\frac{PR_0(2-\mu_a)}{2(R_1/R_0+1)Ed} \quad , \quad (2)$$

式中: μ_a 和 E 分别为基底材料的泊松比和杨氏模量, R_0 、 R_1 分别为碳纤维管的内半径和外半径, d 为碳纤维管的壁厚。当温度恒定时,由式 (1) 和式 (2) 可知,此时压力传感光栅中心反射波长的变化为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{-(1-P_e)R_0(2-\mu_a)}{2(R_1/R_0+1)Ed} \Delta P \quad . \quad (3)$$

由此可知,封装后压力传感光栅反射波长的变化与压力是呈线性关系的。

3 实验结果与分析

3.1 温度响应测试

光纤温度压力传感器测试装置如图 3 所示。测试装置主要由传感解调系统、液压调节测量系统和恒温系统组成。传感解调系统由超连续宽带光源(NKT Photonics)、光谱仪(AQ6370B)、光纤耦合器和光纤布拉格光栅组成。液压调节测量系统由液压调节器、精密压力测量仪和高压反应釜

组成。恒温系统主要由智能恒温油槽进行精确控温, 控温精度为 0.1 ℃, 油槽内放入硅油加热, 进而对反应釜内器件进行加热恒温。

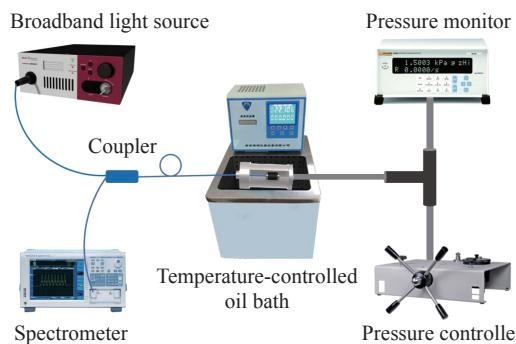


图 3 光纤温度压力传感器测试装置图

Fig. 3 Test device diagram of optical fiber temperature and pressure sensor

为了获得参考光栅和压力传感光栅的温度灵敏度, 在常压情况下, 通过恒温油槽加热该传感器。从室温逐渐升高到 150 ℃, 温度间隔为 20 ℃, 每个温度点保温 30 min, 并通过光谱仪记录对应光谱。图 4 为传感器两种光栅的谐振波长与温度拟合曲线。参考光栅温度灵敏度为 10.59 pm/℃, 压力传感光栅温度灵敏度为 29.16 pm/℃。压力传感光栅温度灵敏度高于参考光栅温度灵敏度的原因是传感光栅被固定在碳纤维管表面, 由于热膨胀效应, 会起到一定的温度增敏效果。

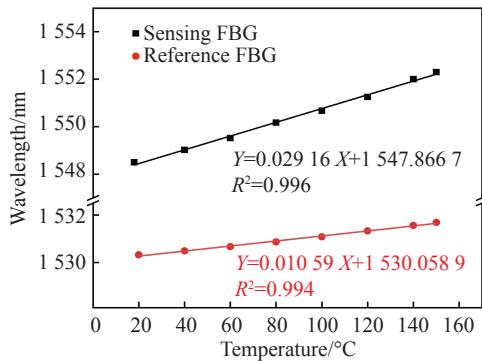


图 4 传感器两种光栅的谐振波长与温度拟合曲线
Fig. 4 Fitting curve of the relationship between resonant wavelengths and temperature for two different gratings in the sensor

3.2 常温下压力响应测试

为了验证该传感器的可行性, 首先对其进行了常温下的压力测试。通过液压调节器向反应釜内注入硅油, 并由精密压力测量仪监测反应釜内压强。从 0 MPa 逐渐增加到 80 MPa, 每个压力点保持 2 min, 并通过光谱仪记录下此时光谱。室温(23 ℃)下传感光栅的谐振波长随压力变化的一次拟合曲线如图 5 所示, 传感光栅的压力灵敏度为 -28.18 pm/MPa, 线性拟合度 $R^2=0.995$, 具有很好的线性度, 同时验证了该传感器能够耐 80 MPa 的压强。

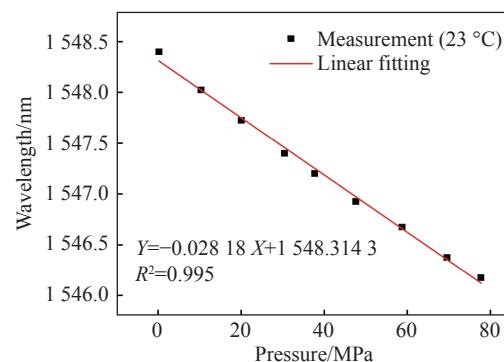


图 5 室温(23 ℃)下传感器的谐振波长与压力拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve for resonant wavelength and pressure at room temperature (23 °C)

3.3 不同温度下压力响应测试

将该压力传感器置于恒温油槽中, 测试其不同温度下的压力响应, 如表 1 所示。110 ℃ 以内的压力灵敏度大约在 -30 pm/MPa, 随着温度继续升高, 压力灵敏度变化较大, 在 150 ℃ 时压力灵敏度达到最大值为 -50.02 pm/MPa。

图 6 为 50 ℃、100 ℃、150 ℃ 下传感光栅的谐振波长随压力的变化情况, 最大压强为 80 MPa, 压力响应均表现出良好的线性关系。不同温度区间的压力灵敏度不同主要是因为在不同温度下碳纤维管中的高温树脂胶的特性发生了变化, 其弹性模量不在是一个常数, 而是一个随温度变化的量, 使其在高温环境下具有更大的形变量, 即高温区的压力灵敏度会更高, 但同样具有很好的线性拟合度。

表 1 传感光栅在不同温度下的压力响应灵敏度

Tab. 1 Pressure response sensitivity of sensing grating at different temperatures

Temperature/℃	23	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Sensitivity/(pm/MPa)	-28.18	-28.65	-29.03	-29.55	-29.87	-30.01	-30.36	-30.55	-30.91	-31.89	-38.53	-43.49	-47.56	-50.02

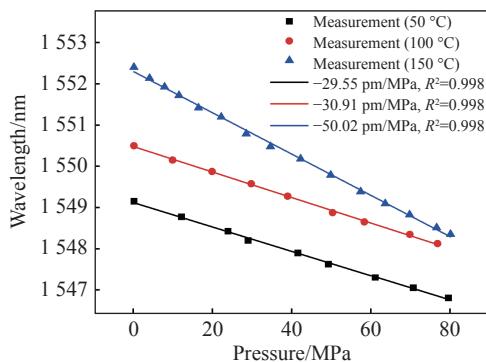


图 6 不同温度下传感光栅的谐振波长与压力拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve for resonant wavelength and pressure at different temperatures

光纤光栅温度和压力交叉敏感问题的解决方法主要可分为:参考光栅法和双波长短阵法^[34]。这里采用的是参考光栅法,即对压力传感光栅和参考光栅中心波长漂移量相减,即可求得温度和压力变化,实现双参量解调。此时实际待测压力 P_T 可以由公式(4)表示^[35]:

$$P_T = \frac{(\lambda_1 - \lambda_{10}) - (\lambda_2 - \lambda_{20}) K_1 / K_2}{K_T} , \quad (4)$$

其中 λ_1 为压力传感光栅的反射波长, λ_{10} 为压力传感光栅的初始波长, λ_2 为参考光栅的反射波长, λ_{20} 为参考光栅的初始波长, K_1 为压力传感光栅的温度灵敏度系数, K_2 为参考光栅的温度灵敏度系数, K_T 为温度 T 下压力传感光栅的压力灵敏度系数。

为了验证该压力传感器的稳定性,将传感器放置于150 °C、80 MPa的环境下,测量24 h内的压力响应波动情况,结果如图7所示。对压力传感光栅每隔30 min采集一个数据点,可以发现该

传感器在24 h内的波长波动为±0.03 nm,这主要由恒温油槽温度波动和光谱仪解调精度决定的,实验结果表明该压力传感器在高温高压环境下表现出很好的稳定性。

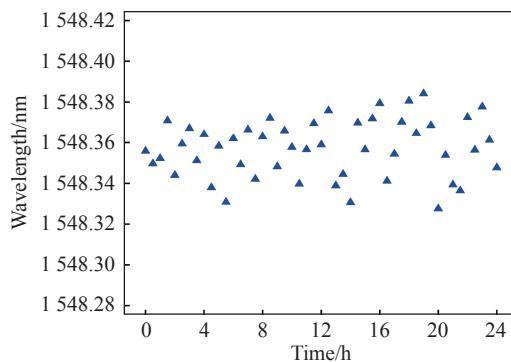


图 7 光纤压力传感器稳定性测试
Fig. 7 Stability test of optical fiber pressure sensor

4 结 论

本文提出了一种基于碳纤维管压力增敏型的光纤光栅温度压力传感器,并建立了压力分析模型,对传感器封装和测试进行了详细分析。实验结果表明,该传感器能够在150 °C、80 MPa环境中稳定工作,压力灵敏度最高可达-50.02 pm/MPa,且压力响应表现出很好的线性度。通过引入参考光栅,实现对温度和压力双参量解调。这种光纤压力传感器有望应用于油气井下的开采,同时也验证了这种碳纤维复合材料在油气井苛刻环境下作为传感器应用的可行性。

参考文献:

- [1] QIAO X G, SHAO ZH H, BAO W J, et al.. Fiber Bragg grating sensors for the oil industry[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 429.
- [2] ERLANDSEN S, VOLD G, MAKIN G D. World's first multiple fiber-optic intelligent well: intelligent wells[J]. *World Oil*, 2003, 224(3): 29-32.
- [3] 丁润琪,侯尚林,雷景丽,等.太赫兹正六边形光子晶体光纤的液体传感[J].发光学报,2019,40(2): 272-276.
- [4] DING R Q, HOU SH L, LEI J L, et al.. Liquid sensing of hexagonal photonic crystal fibers for terahertz wave[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(2): 272-276. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 陈静,杨曌,黄宇豪,等.基于荧光猝灭效应的光纤传感器研究进展[J].发光学报,2020,41(10): 1269-1278.
- [7] CHEN J, YANG ZH, HUANG Y H, et al.. Research progress of optical fiber sensors based on fluorescence quenching effect[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1269-1278. (in Chinese)
- [8] 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)
- [7] 吴妃娜, 夏历. 基于微波光子学的准分布式光纤传感解调技术[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 245-263.
- WU N SH, XIA L. Interrogation technology for quasi-distributed optical fiber sensing systems based on microwave photonics[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 245-263. (in Chinese)
- [8] 饶春芳, 吴锴, 胡友德, 等. 光纤布拉格光栅在医用蒸汽灭菌器温度监测的应用[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(9): 1930-1938.
- RAO CH F, WU K, HU Y D, et al.. Application of fiber Bragg grating in temperature monitoring of medical steam sterilizer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1930-1938. (in Chinese)
- [9] ZHOU X L, YU Q X, PENG W. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for down-hole application[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 289-299.
- [10] 刘明尧, 杜常饶, 武育斌. 环氧树脂封装的EFPI-FBG复合压力温度传感器[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(10): 2080-2088.
- LIU M Y, DU CH R, WU Y B. EFPI-FBG composite pressure and temperature sensor embedded in epoxy resin[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2080-2088. (in Chinese)
- [11] QI X G, WANG SH, JIANG J F, et al.. Fiber optic Fabry-perot pressure sensor with embedded MEMS micro-cavity for ultra-high pressure detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2719-2725.
- [12] PADIDAR S, AHMADI V, EBNALI-HEIDARI M. Design of high sensitive pressure and temperature sensor using photonic crystal fiber for downhole application[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1590-1599.
- [13] SADEGHI J, LATIFI H, SANTOS J L, et al.. Behavior of a hollow core photonic crystal fiber under high radial pressure for downhole application[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(7): 071910.
- [14] FU H Y, WU CH, TSE M L V, et al.. High pressure sensor based on photonic crystal fiber for downhole application[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(14): 2639-2643.
- [15] ZHAO Y, LIAO Y B, LAI SH R. Simultaneous measurement of down-hole high pressure and temperature with a bulk-modulus and FBG sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(11): 1584-1586.
- [16] RONG Q ZH, QIAO X G. FBG for oil and gas exploration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2502-2515.
- [17] 王宏亮, 宋娟, 冯德全, 等. 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(3): 545-551.
- WANG H L, SONG J, FENG D Q, et al.. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 545-551. (in Chinese)
- [18] MACHAVARAM V R, BADCOCK R A, FERNANDO G F. Fabrication of intrinsic fibre Fabry-Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 138(1): 248-260.
- [19] ZHANG Y N, YUAN L, LAN X W, et al.. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser: erratum[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 17.
- [20] ZHOU P, LIAO C R, LI ZH Y, et al.. In-fiber cascaded FPI fabricated by chemical-assisted femtosecond laser micromachining for micro-fluidic sensing applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3214-3221.
- [21] WANG Z, LIU H, MA Z, et al.. High temperature strain sensing with alumina ceramic derived fiber based Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27691-27701.
- [22] LI W CH, YUAN Y G, YANG J, et al.. In-fiber integrated high sensitivity temperature sensor based on long Fabry-Perot resonator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14675-14683.
- [23] ZHANG ZH, HE J, DU B, et al.. Measurement of high pressure and high temperature using a dual-cavity Fabry-Perot interferometer created in cascade hollow-core fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6009-6012.
- [24] LIU Y G, WANG Y X, YANG D Q, et al.. Hollow-core fiber-based all-fiber fpi sensor for simultaneous measurement of air pressure and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11236-11241.
- [25] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 519-531.
- WU J, WU H P, HUANG J B, et al.. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519-531. (in Chinese)
- [26] ZHOU C M, PANG Y D, QIAN L, et al.. Demodulation of a hydroacoustic sensor array of fiber interferometers based on ultra-weak fiber Bragg grating reflectors using a self-referencing signal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019,

- 37(11): 2568-2576.
- [27] XU M G, REEKIE L, CHOW Y T, *et al.*. Optical in-fibre grating high pressure sensor[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(4): 398-399.
- [28] 孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 耐高压光纤Bragg光栅压力传感技术研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 823-825.
SUN A, QIAO X G, JIA ZH A, *et al.*. The study of fiber Bragg grating pressure sensor with high pressure-resistance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 823-825. (in Chinese)
- [29] 申人升, 于永森, 张金, 等. 薄壁应变筒式光纤光栅压力传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(11): 1433-1436.
SHEN R SH, YU Y S, ZHANG J, *et al.*. Investigation of FBG pressure sensor based on thin wall strain tube[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2008, 19(11): 1433-1436. (in Chinese)
- [30] FENG P F, SONG G J, LI X R, *et al.*. Effects of different "rigid-flexible" structures of carbon fibers surface on the interfacial microstructure and mechanical properties of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 583: 13-23.
- [31] GUO F L, HUANG P, LI Y Q, *et al.*. Multiscale modeling of mechanical behaviors of carbon fiber reinforced epoxy composites subjected to hygrothermal aging[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113098.
- [32] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
LI K J. *New Sensor Technical Manual*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [33] GARCIA I, ZUBIA J, DURANA G, *et al.*. Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring[J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 15494-15519.
- [34] XIONG L, JIANG G ZH, GUO Y X, *et al.*. Investigation of the temperature compensation of FBGs encapsulated with different methods and subjected to different temperature change rates[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 917-926.
- [35] 吕京生, 郭士生, 王昌, 等. 一种新型光纤油井下压力传感器[J]. 山东科学, 2011, 24(2): 47-50.
LÜ J SH, GUO SH SH, WANG CH, *et al.*. A new optical fiber pressure sensor for oil well application[J]. *Shandong Science*, 2011, 24(2): 47-50. (in Chinese)

作者简介:

薛兆康(1994—),男,山东聊城人,硕士研究生,2017年于潍坊学院获得学士学位,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: 2280825310@qq.com



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