

文章编号:1001-5078(2024)09-01491-06

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于拍频解调边孔光纤光栅传感系统研究

曾子可^{1,2}, 陈天威², 梁磊²

(1. 武汉理工大学 理学院 物理系, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对边孔光纤光栅传感器在井下高温高压环境波长扫描分辨率低的问题,对传统拍频解调的传感光路进行改进,设计了一种适用于井下环境的基于激光拍频的边孔光纤光栅压力传感系统,可以在井下进行长距离传感,有效的提高了其分辨率。并且结合自注入锁定技术,与传统拍频解调光路把激光器作为传感器不同,将传感器和光纤激光器分离,便于应用于井下环境。系统使用线性啁啾光纤布拉格光栅作为色散补偿单元和激光器一侧的反射镜,将光纤光栅由于压力引起的波长变化转变为谐振腔的腔长变化,提升了系统的检测灵敏度。解释了所用方法的结构和测量原理,分析和计算了测量的结果和精度。实验结果表明,该系统具有较高的灵敏度和测量精度,压力灵敏度为 0.12553 MHz/MPa。所提方法具有解调系统简单,稳定性好,传感距离可调等优点。

关键词: 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 光纤激光器; 拍频检测

中图分类号: TN256; TH74 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.022

Research on side hole fiber Bragg grating sensing system based on beat frequency demodulation

ZENG Zi-ke^{1,2}, CHEN Tian-wei², LIANG Lei²

(1. Department of Physics, College of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. National Engineering Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In response to the problem of low wavelength scanning resolution of side hole fiber Bragg grating sensors in high-temperature and high-pressure annular mirrors underground, the traditional sensing optical path for frequency demodulation is improved, and a laser frequency based side hole fiber Bragg grating pressure sensing system suitable for underground annular mirrors is designed, which can perform long-distance sensing underground and effectively improve its resolution. In addition, combined with self-injection locking technology, it separates the sensor from the fiber laser unlike the traditional beat frequency demodulation optical path that uses lasers as sensors, making it easy to be applied in underground environments. The system uses a linearly chirped fiber Bragg grating as a dispersion compensation unit and a reflector on one side of the laser, transforming the wavelength change caused by pressure on the fiber Bragg grating into the cavity length change of the resonant cavity, thereby improving the detection sensitivity of the system. Moreover, the structure and measurement principle of the method used are explained, and the measurement results and accuracy are analyzed and calculated. The experimental results show that the system has high sensitivity and measure-

基金项目: 三亚崖州湾科技城管理局科研项目 (No. SKJC-2020-01-016); 分布式光纤流量监测与解释技术研究项目 (No. P21052) 资助。

作者简介: 曾子可 (1999 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感系统, 光纤激光器拍频解调, 边孔光纤光栅温压传感。E-mail: 3282849361@qq.com

通讯作者: 梁磊 (1963 -), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型光纤传感器及信息处理, 光纤智能材料结构, 基于光纤传感的大型装备与结构的安全监测与预警技术。E-mail: L30L30@126.com

收稿日期: 2024-01-15

ment accuracy with a pressure sensitivity of 0.12553 MHz/MPa. The proposed method has the advantages of a simple demodulation system, good stability, and adjustable sensing distance.

Keywords: fiber optic sensing; fiber Bragg grating; fiber laser; beat frequency detection

1 引言

油气井下的极端环境存在高温、高压、腐蚀干扰、狭小空间等许多影响电类传感器可靠性和长期稳定性的因素。作为光纤传感领域具有代表性的光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器,在各类情景下广泛应用,和传统的电类传感器相比,具有众多优点,如光路传输抗电磁干扰、传感器封装外壳尺寸小、传感靠重量轻的光纤等^[1]。外界物理量作用到光纤光栅上后,光纤光栅的布拉格波长会移动,通过解调此时收到的波长信息即可得到外界物理量的变化^[2]。而其他传感元件,如分布式则存在系统损耗大、光纤激光器传感收到光源功率波动影响大、不够稳定等各类问题^[3-4];光纤光栅的不同封装比如添加隔热材料,压力增敏设计则可以实现温度、压力等多参量的测量^[5-6]。

边孔光纤(Side Hole Fiber, SHF)是保偏光纤的一种,单模光纤光栅传感器由于交叉敏感的问题,往往需要做隔热增敏等处理,使得系统往往比较复杂^[7]。SHF光栅相对于单模光纤光栅来说,边孔光纤独特的双折射特性^[8]是解决该问题的有效方式。其主要特点是在光纤包层内有两个对称分布在纤芯两侧的空气孔,这种特殊结构使其在压力测量方面有着很大的优势^[9],因为存在这两个空气孔,当外界压力作用到光纤上时,纤芯水平方向受到的压力和垂直方向不同,光纤中传输光的振动模式会改变,能够区分压力与温度的作用,实现温压同时测量^[10],所以实验选用SHF光栅作为传感单元。

光纤光栅传感的关键是解调信号。一般在解调端口直接检测光栅反射波长的变化^[11],但是波长解调采用的耦合或者干涉法因为系统比较复杂会影响稳定性^[12]。众所周知,经过光电探测器的转换后,在电域处理信号比光域要简单许多^[13],因为避免了复杂的光学器件^[14]。一般的解调系统是用光纤激光器作为传感单元^[15],无法脱离光纤激光器进行长距离传感,不能应用在井下高温高压环境。

本文提出并设计了一种基于激光器拍频解调的边孔光纤光栅压力传感系统。与传统的光纤激光器拍频解调不同,该系统使用边孔光纤光栅作为传感

元件,结合自注入锁模技术将传感器和激光器分离,避免激光器收到恶劣环境的影响,适用于井下长距离传感/可以在井下进行长距离传感。当外界压力改变光栅中心波长后,反馈回激光腔,由于模式竞争,光纤激光器输出会改变。此时通过检测激光器输出的拍频信号测量压力变化,大幅提高了系统的检测灵敏度,相比传统的光学解调,该系统利用成熟的电学解调技术降低了解调成本,提高传感器的灵敏度,满足了井下环境。

2 基本原理

多纵模拍频光纤激光传感^[16]的结构如图1所示,激光的三要素泵浦光增益介质和谐振腔全光路设计,两个中心波长的光纤布拉格光栅作为反射镜,通过WDM导入泵浦光,在光栅之间接入掺铒光纤,就构成了一个有源的光纤激光器谐振腔。



图1 多纵模光纤激光传感器基本结构

Fig. 1 Basic structure of multi longitudinal mode fiber laser sensor

泵浦光源注入该激光器谐振腔中,掺铒光纤中粒子数反转到高能态,光纤光栅的反射带宽远远大于激光器谐振腔频率,产生多个连续离散的激光模式^[17]。

最终激光器中多纵模生成频率信号 V_q 为:

$$V_q = \frac{c}{\lambda} = \frac{cq}{2nL} \quad (1)$$

式中, q 取正整数是腔内激光模式的数量; c 是光速; n 是腔内折射率; L 是激光器的内腔长。那么相邻两个谐振频率的拍频信号为 $c/2nL$ 。光纤激光谐振腔输出的任意两个纵模激光之间拍频信号可用图2表示。

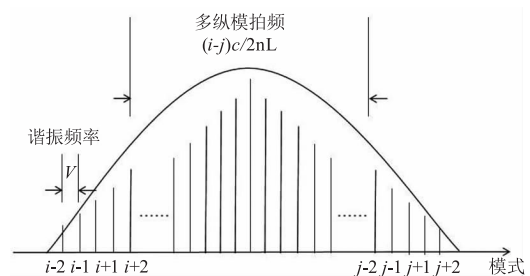


图2 不同纵模的频率和任意两个纵模之间的拍频

Fig. 2 The frequency of different longitudinal modes and the beat frequency between any two longitudinal modes

可以发现,拍频信号作为传感信号,当多纵模激光传感器腔长发生改变后,多纵模激光的模式间隔也会随之发生改变,从而改变拍频传感信号频率^[18]。

由于使用的边孔光栅,每一个纵模左右还会对应出现一组偏振模拍频^[19],频率为两正交偏振激光的频率差。被传感的信号引起激光腔内偏振模式变化时,偏振模拍频也会改变。可以用来检测外界的环境变化。

3 系统结构及工作原理

边孔光纤光栅自注入锁模拍频检测光路系统结构如图3所示。

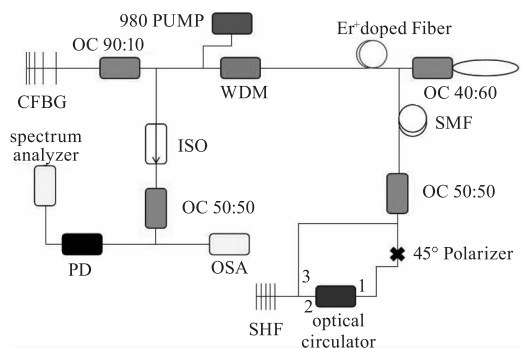


图3 基于自注入的边孔光纤光栅传感系统原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the principle of self injection based side hole fiber optic grating sensing system

为了实现自注入,实验中将多纵模激光谐振腔进行了改进,将谐振腔一端的反射镜换成了由耦合器(OC)构成的光纤环境,另一端的反射镜线性啁啾光栅(CFBG)和光纤环境组成一个光纤谐振腔,有效地避免了两个FBG中心波长不匹配带来的噪声,光纤环境相当于一个反射镜,这样就提高了能量利用率和信噪比,而且实现了将外界波长变化通过自注入反馈回激光腔内。

980nm 泵浦光源(Pump LD)产生的泵浦光,通过波分复用器(WDM)耦合进光纤谐振腔,经过掺铒光纤(Er + doped Fiber)后,当电流达到阈值,铒纤在激励下粒子数反转,产生受激辐射,受激辐射的光在谐振腔内不断被 CFBG 和光纤环境反射,不断经过掺铒光纤放大,CFBG 的色散作用可以等效看作腔长不同,稳定下来的模式光形成激光,在谐振腔中产生多纵模拍频。到光纤环境和一段单模光纤后传输到测量单元。为了避免端面反射,在输出一端添加了光隔离器(ISO),最后在射频(RF)频谱分析仪上接受经探测器(PD)光电转化的电域信号,可以看到

稳定的激光多纵模拍频信号。

因为需要偏振光,出射激光经过一定长度的单模光纤(SMF)后进入耦合器,45°起偏后进入光环形器一号口输出到二号口,边孔光纤光栅反射光进入三号口,最终作为注入光耦合进入激光器谐振腔内。

实验中将传感光栅封装在压力台内,通过均匀加压来改变边孔光纤光栅的波长,反射的光栅中心波长自注入到激光器,由于模式竞争,引起激光器输出变化,由于啁啾光栅提供的色散作用,等效于改变谐振腔长度,谐振腔内多纵模模式之间的频率间隔发生改变,得到施加在传感光栅上压力的大小。

对式(1)进行微分可得拍频的变化与腔长变化的关系为:

$$\delta(\Delta\nu) \approx \Delta\nu \times \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

式中, $\Delta\nu$ 为拍频频率,谐振腔腔长的变化量是 ΔL ,表达式为:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \Delta\lambda \cdot c \quad (3)$$

式中, D 是啁啾光纤光栅的色散率; $\Delta\lambda$ 为光纤光栅中心波长的变化量。根据啁啾光纤光栅的色散率,采用(3)式的形式可以得到光纤光栅中心波长的具体变化量,从波长解调转变为了拍频解调。

4 实验结果分析

实验所用的啁啾光栅带宽为0.5 nm,中心波长在1550.09 nm,色散量为-1678.34 ps/nm。边孔光纤光栅3 dB带宽为0.7 nm,中心波长1550.01 nm,与啁啾光栅中心波长匹配,反射率75%。设计谐振腔长度约为12.8 m,其中掺铒光纤长度6 m。外腔单模光纤长度约为2 km。

搭建好光路后,先不接入自注入锁定模块,调节泵浦光功率,开始功率较低,形成不了稳定的激光,逐步调节泵浦功率达到产生激光的阈值,可以观测到稳定的激光输出,输出的激光波长即 CFBG 的中心波长1550.09 nm左右。之后接入测量光栅,边孔光纤光栅的反射光就可以注入到激光器内腔,此时边孔光纤光栅中心波长光模式的强度在激光腔内最强,从而抑制了谐振腔内的自发辐射,此时激光腔的输出波长在带宽内和边孔光纤光栅的中心波长保持一致。此时光谱仪观测的激光器输出激光与边孔光纤光栅中心波长一致,如图4所示,此时全扫宽的多纵模拍频信号如图5所示。

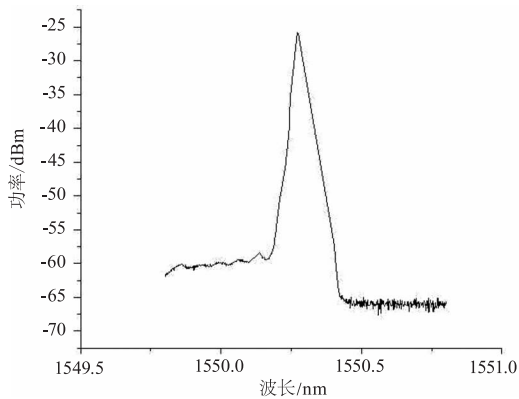


图 4 光谱仪上输出激光谱线

Fig. 4 Output laser spectral lines on the spectrometer

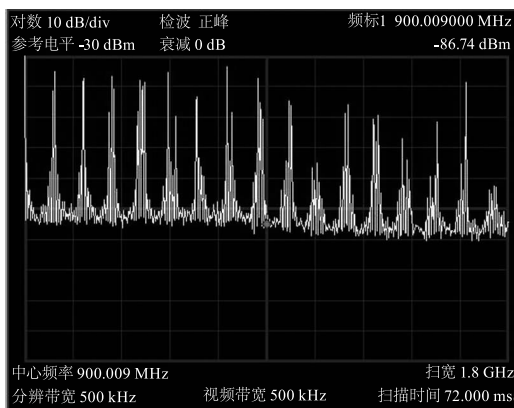


图 5 频谱仪上观测到的拍频信号

Fig. 5 The beat frequency signal observed on the spectrograph

由式(1)可得,根据公式计算理论上相邻纵模的频率间隔约为 7.81 MHz,实际拍频信号相邻纵模之间的频率间隔为 7.75 MHz。

观测到的拍频频率间隔与理论计算值相吻合。选择更高的拍频频率观测,以 110 倍频($V = 876.3 \text{ MHz}$)为检测频率,拍频频率变化会更大更明显,频谱扫宽为 30 MHz 时的频谱图如图 6 所示。理论计算灵敏度约为 0.137 MHz/MPa。

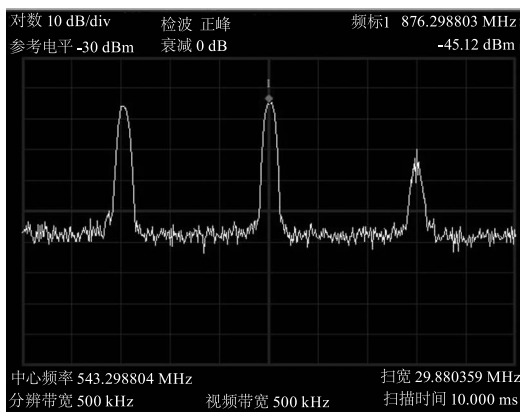


图 6 较高拍频频率的频谱等间距拍频信号

Fig. 6 Spectral equidistant beat frequency signals with higher beat frequency

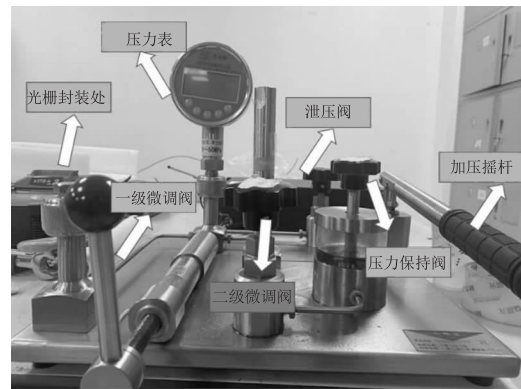


图 7 压力标定台

Fig. 7 Pressure calibration table

方案以压力传感为例进行了实验验证。将光纤光栅传感器压力台中,如图 7 调节压力台内的压力从 10 MPa 以步长 5 MPa 逐步升高到 45 MPa,发现压力台中光纤光栅的中心波长随着压力的升高变化,发生波分离现象如图 8。

根据前文描述的全过程,观察对应的拍频信号。实验数据重复测量,最后还是取较为稳定并且强度适中的 896.27 MHz 作为观测频率。

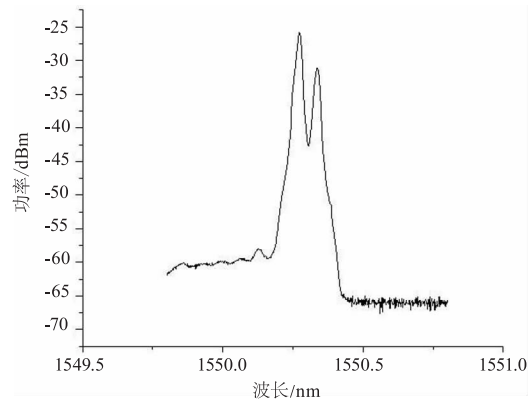


图 8 施加压力后的波峰分离现象

Fig. 8 The phenomenon of peak separation after applying pressure

图 9 显示了压力从 0 MPa 以步长 5 MPa 逐步升高到 25 MPa 时激光器输出拍频的移动情况,拍频频率随着激光器工作波长的变化相应变化。根据选定的观测频率的变化量可得压力变化量和观测频率变化量关系。

利用软件拟合压力从 0 MPa 以步长 5 MPa 逐步升高到 45 MPa 时的波长和频率曲线分别如图 10 和图 11 所示,拟合度分别为 0.9978 和 0.9998。

通过搭建光路实验验证了拍频检测的可行性。波长灵敏度为 10.7 pm/MPa,拍频灵敏度为 0.125 MHz/MPa。同时,对比波长和拍频的对应公

式,提高了系统的检测灵敏度约 12 倍。

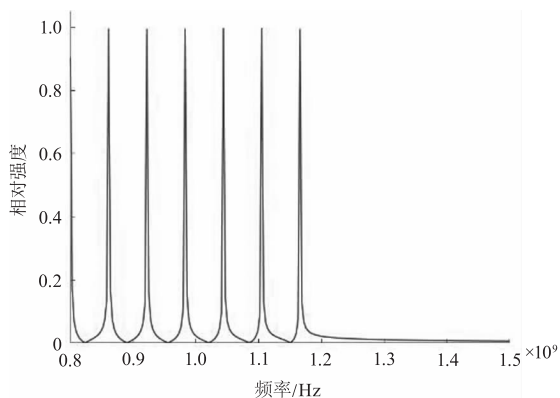


图9 不同压力下观测到的频谱

Fig.9 Spectral observations under different pressures

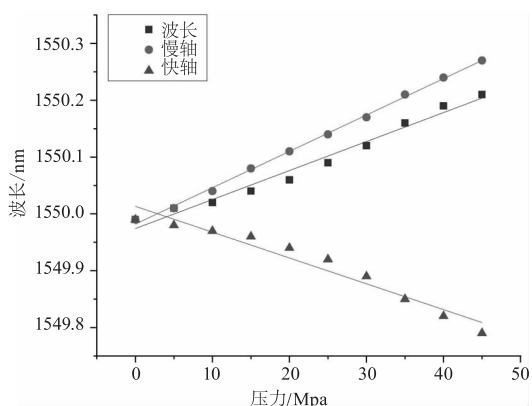


图10 不同压力下波长的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of wavelengths under different pressures

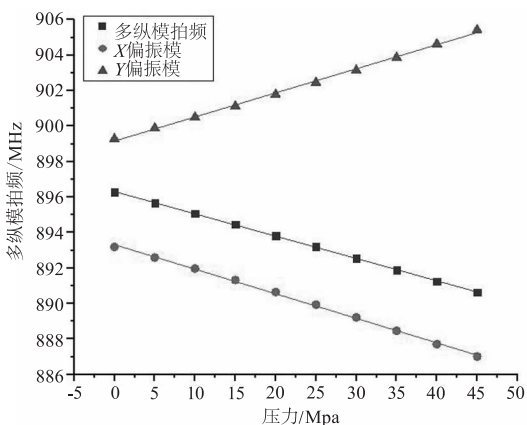


图11 不同压力下拍频频率的拟合曲线

Fig. 11 Fitting curves of beat frequency under different pressures

根据(3)式,系统的检测灵敏度随着测量选取的拍频频率提高。但是过高会导致稳定性下降,该传感器在光纤光栅传感器所具有的抗电磁干扰外,解调更简单,成本更低。

本文测量结果的精确程度受激光拍频稳定性的影响,在实验中发现多用一段掺铒光纤可以更好达

到锁模,实现拍频信号的稳定,因为起到了可饱和吸收作用。而不断的选择调节泵浦功率到刚好产生激光,可以稳定拍频。

检测拍频参数结论与计算的拍频移动量数据相符。后续提高测量精度可以选择更高的拍频信号但是稳定性会下降,或提升成本采用分辨率更高的频谱仪。

5 结论

本文以拍频信号取代波长信号进行光纤传感,提出并实现了一种基于多纵模拍频光纤激光器的边孔光纤光栅压力传感光路。传感器采用了自注入结构,把激光器和光栅分离,有效延长了传感距离,适用于石油井下。在光纤光栅传感器工作时能够将压力等效为谐振腔的变化。经过实验测试最终得到:在 0 ~ 45 MPa 内,该传感器的压力灵敏度为 0.12553 MHz/MPa,线性度为 0.9998 左右。

实验发现,每个多纵模信号的出现左右分布的偏振模信号。边孔光纤光栅的空气孔会引起固有双折射,而施加压力后又会产生压力双折射,于是在谐振腔内不同偏振态就会产生拍频。利用两种不同拍频进行温度压力同时传感。

参考文献:

- [1] Jiao S X,Zhao Y, Gu J J. Simultaneous measurement of humidity and temperature using a polyvinyl alcohol tapered fiber Bragg grating [J]. Instrumentation Science & Technology,2017,46(5):463-474.
- [2] Liao Yanbiao. Optical fiber of light[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2000. (in Chinese)
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [3] K Cook,C Smelser,J Canning, et al. Regenerated femto-second fibre Bragg gratings[C]//Third Asia Pacific Optical Sensors Conference,2012.
- [4] Gao Yuan. Study on frequency tuning technology of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser[J]. Laser & Infrared,2016,46(10):1225-1229. (in Chinese)
高原. 光纤光栅外腔半导体激光器频率调谐技术研究[J]. 激光与红外,2016,46(10):1225-1229.
- [5] Yang M,Dai J,Zhou C, et al. Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magneto strictive thin films as sensing materials[J]. Optics Express,2009,17(23):20777-20782.
- [6] Zhao H,Sun F F, Yang, Y Q, et al. A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor[J].

- Optics Communications, 2013, 308(11): 64 – 69.
- [7] Leal-Junior A, Frizera A, Marques C. A fiber Bragg gratings pair embedded in a polyurethane diaphragm; towards a temperature-insensitive pressure sensor [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131: 106440.
- [8] Xie H M, Dabkiewicz P, Ulrich R, et al. Side-hole fiber for fiber-optic pressure sensing [J]. Optics Letters, 1986, 11(5): 333 – 335.
- [9] Yamate T, Ramos R T, Schroeder R J, et al. Thermally insensitive pressure measurements up to 300 degree c using fiber Bragg gratings written onto side hole single mode fiber [C]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2000, 4185.
- [10] Frazao O, Silva S, Baptista J, et al. Simultaneous measurement of multiparameters using a Sagnac interferometer with polarization maintaining side-hole fiber [J]. Applied Optics, 2008, 47(27): 4841 – 4848.
- [11] Wang Jin, Wang Yongjie, Zhang Dengpan. Research progress of fiber Bragg grating temperature sensors for ocean application [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(5): 515 – 514. (in Chinese)
王璿,王永杰,张登攀. 面向海洋应用的光纤光栅温度传感器研究进展 [J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 515 – 514.
- [12] Guo Ting, Hui Xiaoqiang. The simultaneous measurement of strain, temperature and humidity by FBG sensors [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(1): 43 – 46. (in Chinese)
郭婷,惠小强. FBG 传感对应变, 温度及湿度的同时测量 [J]. 压电与声光, 2013, 35(1): 43 – 46.
- [13] Hadeler O, Ronnekleiv E, Ibsen M, et al. Polarimetric distributed feedback fiber laser sensor for simultaneous strain and temperature measurements. [J]. Applied Optics, 1999, 38(10): 1953.
- [14] Gao L, Huang L, Chen L, et al. Study on fiber ring laser in sensing application with beat frequency demodulation [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45(1): 137 – 141.
- [15] Han Zhiyong, Hu Yunxin, Chen Xuefeng, et al. Fiber laser beat frequency sensor [J]. Optoelectronic Technology, 2017, (4): 231 – 239. (in Chinese)
韩志勇, 胡蕴薪, 陈雪峰, 等. 光纤激光拍频传感器 [J]. 光电子技术, 2017, (4): 231 – 239.
- [16] Zhang Peipei, Zhang Peng, Liang Xiaohong. Experimental study on output characteristics optimization of single cavity fiber laser [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(7): 883 – 887. (in Chinese)
张培培, 张鹏, 梁小红. 单谐振腔光纤激光器输出特性优化实验研究 [J]. 激光与红外, 2021, 51(7): 883 – 887
- [17] Liu Shengchun, Zhang Jintao, Zhang Liying, et al. Sensing characteristics and dynamic observation of multi-longitudinal mode fiber laser [J]. Research & Exploration in Laboratory, 2013, 32(7): 10 – 13. (in Chinese)
刘盛春, 张金涛, 张丽莹, 等. 光纤激光器多纵模动态观测及传感特性 [J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(7): 10 – 13.
- [18] Liu Shengchun. Research on fiber laser sensing technology based on beat frequency demodulation technology [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011. (in Chinese)
刘胜春. 基于拍频解调技术的光纤激光传感技术研究 [D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [19] Guan B O, Jin L, Zhang Y, et al. Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors [J]. Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1097 – 1112.