

基于四波混频的光纤激光器传感器增敏研究

刘哲*, 邹喜华, 刘璞宇

西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756

摘要 提出一种基于四波混频效应的双波长光纤激光器传感器增敏方法,以提高基于保偏光纤光栅的双波长激光器传感器的灵敏度。双波长输出的波长间隔对温度、应力等外界待测量有很好的传感响应。利用四波混频效应可扩大此波长间隔。本实验中,使用 3 阶四波混频效应增敏方案可实现传统保偏光纤光栅激光器传感器温度灵敏度自 $-0.62 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 至 $-4.32 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的提升,增敏近 7 倍。

关键词 光纤光学; 光纤光栅传感; 双波长光纤激光器; 非线性光学; 增敏

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170632

Sensitivity Enhancement of Fiber Laser Sensors Using Four-Wave Mixing

Liu Zhe*, Zou Xihua, Liu Puyu

Center for Information Photonics & Communications, School of Information Science and Technology,
Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China

Abstract We propose an approach based on the four-wave mixing (FWM) effect for improving the sensitivity of a dual-wavelength fiber laser sensor with polarization-maintaining fiber Bragg grating (PM-FBG). The wavelength interval of the dual wavelength output is proportional to external measures such as temperature and strain. Experimental results show that the wavelength interval can be increased using the FWM effect. In particular, we observe that the temperature sensitivity of the conventional laser sensor with PM-FBG is improved from $-0.62 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ to $-4.32 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ while using third-order FWM-based scheme, and a sensitivity enhancement of nearly 7 times is achieved.

Key words fiber optics; fiber grating sensing; dual-wavelength fiber lasers; nonlinear optics; sensitivity enhancement

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3510

1 引言

光纤传感器^[1]具有抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘、耐高温^[2]、高灵敏度等优势,因此被广泛应用于油井、隧道^[3]等恶劣环境监测中。随着光纤光栅工艺的日渐完善,越来越多种类的光纤光栅(FBG)被应用于不同的传感应用中。其中,保偏光纤光栅^[4-6](PM-FBG)因具有特殊的传播特性及传感特性而被广泛用于解决光纤光栅交叉敏感问题^[7]。但是光纤光栅传感灵敏度及传感分辨率依旧被接收机分辨率限制。

目前分辨率提升方案主要集中于优化解调方案及突破接收机分辨率^[8-10]两方面。但为了实现更高的传感分辨率,传感器本身的灵敏度提升同样重要。FBG 传感器本身的灵敏度被 FBG 材料及结构限制,因此,为了提高其灵敏度,往往需要对 FBG 进行增敏加工,如采用 FBG 聚合物包层^[11]、微结构 FBG^[12]及增敏封装^[13]等。然而,对光栅的加工处理往往会影响到其传输特性,削弱了光栅原本的传感优势^[14]。在此背景下,研究人员开始关注传感器信号输出后的光学增敏技术,例如四波混频(FWM)增敏方案^[14-16],这种方案可以在不改变传感器结构前提

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-04-14; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61475128)

* E-mail: swjtulz1994@163.com

下成倍地提升传感灵敏度。但现阶段该方面的研究还停留在单波长激光传感器^[17-18]方面,且通常需要一个辅助激光器同时抽运产生 FWM 增益。

本文提出并研究了一种基于 FWM 非线性效应的光纤激光传感器辅助增敏方案,以 PM-FBG 双波长激光器传感方案为传感信息来源,避免使用辅助激光器。此增敏方案作为传感辅助装置,其增敏原理是基于对传感器输出的传感信息的光学处理,因此能够很好地与传感探针封装及加工等增敏措施相结合。当外界待测物理量改变 PM-FBG 激光传感器波长差时,FWM 谐波光可以放大此波长差的变化,FWM 阶数越高,变化量放大越明显,增敏倍数越大。本文验证了增敏方案中 1~3 阶 FWM 的增敏效果,结果表明 3 阶增敏近 7 倍,实现了光谱仪 0.02 nm 分辨率下的温度传感分辨率自 33 °C 至 4.7 °C 的提升;同时验证了此方案对 PM-FBG 激光器传感器的轴向应力传感灵敏度同样具有增敏反应,但增敏后的传感灵敏度会受限于传感器固有的灵敏度特性。

2 系统结构与原理

2.1 PM-FBG 传感原理

由于保偏光纤(PMF)的特殊结构,在保偏光纤上刻写 FBG 时,两轴对应的光栅的光栅周期 Λ 相同,但有效折射率 n_{eff} 不同。两轴有效折射率分别表示为 n_x 与 n_y ,其中: x 代表 x 方向偏振轴,对应 PMF 的快轴; y 代表 y 方向偏振轴,对应 PMF 的慢轴,即 $n_y > n_x$ 。保偏光纤光栅两轴对应的反射谱中心波长可表示为^[19]

$$\begin{cases} \lambda_x = 2\Lambda n_x \\ \lambda_y = 2\Lambda n_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: λ_x 、 λ_y 分别为 PM-FBG 的 x 、 y 轴对应的反射光波长, $\lambda_y > \lambda_x$ 。因此两反射峰中心波长的波长差 $\Delta\lambda_{xy}$ 表示为

$$\Delta\lambda_{xy} = \lambda_y - \lambda_x = 2\Lambda B, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_{xy}$ 为 PM-FBG 波长差; B 为 PMF 的双折射率, $B = n_y - n_x$ 。由此可见,PM-FBG 波长差 $\Delta\lambda_{xy}$ 与双折射率 B 及光纤周期 Λ 有关。

PM-FBG 同时受温度及应变影响时,其双峰中心波长与温度、应变的关系可表示为^[20]

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_x \\ \Delta\lambda_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\epsilon_x} & K_{T_x} \\ K_{\epsilon_y} & K_{T_y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda_x$ 、 $\Delta\lambda_y$ 为 λ_x 、 λ_y 的波长漂移量; $\Delta\epsilon$ 、 ΔT 为应变及温度变化量; \mathbf{K} 代表传感响应灵敏度; x 、 y 、 ϵ

及 T 分别代表 x 轴、 y 轴、应变及温度。

由文献[20]可得 \mathbf{K} 的组成表示为

$$K_{\epsilon_x} = 2(n_y - B)\Lambda \left\{ 1 - \frac{(n_y - B)^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\}, \quad (4)$$

$$K_{\epsilon_y} = 2n_y\Lambda \left\{ 1 - \frac{n_y^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\}, \quad (5)$$

$$K_{T_x} = 2(n_y - B)\Lambda \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}\right)_x}{n_y - B} \right], \quad (6)$$

$$K_{T_y} = 2n_y\Lambda \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}\right)_y}{n_y} \right], \quad (7)$$

式中: P_{11} 、 P_{12} 为弹光张量分量(Pockel 系数); ν 为泊松系数; dn_{eff}/dT 代表有效折射率与温度变化的关系; α 代表光纤热膨胀系数。

双折射率 B 与热光效应系数的关系为

$$\left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}\right)_y - \left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}\right)_x = \frac{B}{T_a}, \quad (8)$$

式中: T_a 代表 PMF 制作过程的热退火温度。

结合(4)~(8)式可知,PM-FBG 双峰中心波长对温度及应变的灵敏度因双折射而在数值上存在差异,因此 PM-FBG 双峰波长差对温度及应变都具有传感响应特性,其灵敏度与双折射率 B 对待测量响应程度有关。

2.2 实验结构

图 1 为保偏光纤光栅激光器传感器增敏方案系统结构示意图。该系统主要包括两部分:A 部分为 PM-FBG 激光器传感装置,B 部分为 FWM 增敏装置。

A 部分,光纤激光器结构采用线性谐振腔:2 m 长的掺铒光纤(EDF)作为增益介质;以 980 nm 半导体激光器(康冠公司)作为抽运光源,输出功率为 200 mW,通过一个 980 nm/1550 nm 的波分复用器(WDM)进入 EDF 中抽运;偏振控制器 PC1(PC)为腔内偏振态控制器件;宽带啁啾光栅(CFBG)作为宽带反射镜;PM-FBG 作为正交偏振态双波长反射镜及传感器件。

A 部分输出进入 B 部分光路,利用 PC2 及一个起偏器(polarizer)将正交偏振光调整为同一偏振态,以满足 FWM 相位匹配条件;然后经光功率放大器放大光功率,光放大器使用的是 OPEAK 公司功率可调谐铟镱共掺光纤放大器(EYDFA),型号为

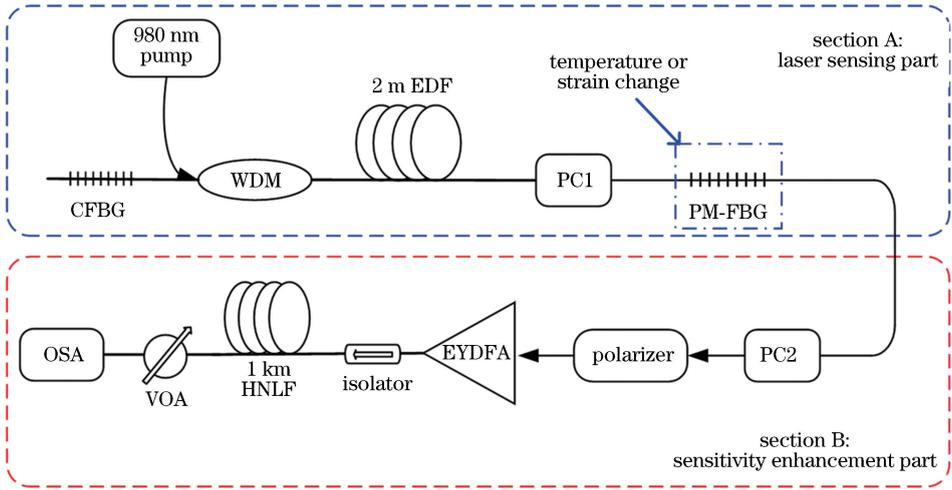


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

C-37-B,工作范围在 1540~1560 nm内,光饱和和输出功率典型值为 37 dBm,经光隔离器(isolator)隔离回光,输出光进入长度为 1 km 高非线性光纤(HNLF)产生 FWM 效应;最后经过可调谐光衰减器(VOA)衰减后使用光谱仪(OSA)观测光谱。其中:HNLF 的非线性系数 $\gamma=30 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,光谱仪使用的是横河(Yokogawa)公司 AQ6370D 光谱分析仪,波长分辨率为 0.02 nm。

2.3 实验原理

在 A 部分 PM-FBG 光纤激光器结构中,CFBG、EDF 及 PM-FBG 共同构成线性腔激光器结构。光在谐振腔内选模并谐振后,只有处于 PM-FBG 与 CFBG 反射谱交集位置的纵模可以在谐振腔内谐振放大,其他纵模被滤除。对应 PM-FBG 中心波长的纵模增益最高,最先达到激光振荡阈值,同时抑制其他纵模增益。激光器稳定谐振后,A 结构将产生窄谱宽激光,此激光偏振态及中心波长位置与 PM-FBG 反射谱特性一致。因此 A 结构可产生正交偏振态的双波长激光输出,定义两波长分别为

λ_s (s 代表信号光)与 λ_p (p 代表抽运光),其波长位置分别与 PM-FBG 反射双峰中心波长 λ_x, λ_y 一致。

如图 2 所示,A 结构产生的双波长激光(λ_s, λ_p)进入 B 结构,经过选偏器件及 EYDFA 放大后的激光入射到 HNLF 中传输时,两波长的光能量将向两侧转移,产生新的谐波光。 λ_s 向 λ_p 转移能量产生 FWM 增益,再继续向长波方向等波长间隔位置转移能量并产生第 1 阶转换光^[21],定义其中心波长为 λ_{c1} ,c 代表转换光,则 $\lambda_{c1}=2\lambda_p-\lambda_s$ 。第 1 阶转换光 λ_{c1} 功率逐渐提升,达到一定功率后继续转移能量并产生更高阶转换光,定义其中心波长为 $\lambda_{cj}(j=1, 2, \dots, n; j$ 代表第 j 阶 FWM 输出光束; n 代表产生的 FWM 阶数),根据文献[14]可知

$$\lambda_{cj} = (j + 1)\lambda_p - j\lambda_s. \quad (9)$$

同时 λ_p 能量也会向 λ_s 不断转移,并向短波方向产生谐波光,定义其为闲频光,中心波长为 $\lambda_{ij}(j=1, 2, \dots, n)$,i 代表闲频光,则

$$\lambda_{ij} = (j + 1)\lambda_s - j\lambda_p. \quad (10)$$

因此 B 部分的输出为等间隔的多波长激光。

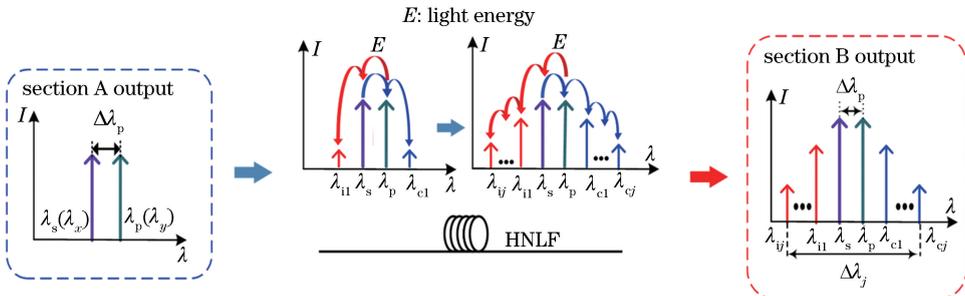


图 2 FWM 产生过程光演化示意图

Fig. 2 Schematic of light evolution in FWM generation process

定义 λ_p 与 λ_s 的波长差(以下简称抽运波长差)为 $\Delta\lambda_p$, 则 $\Delta\lambda_p = \lambda_p - \lambda_s$ 。定义第 j 阶闲频光与第 j 阶转换光间的波长差(简称第 j 阶 FWM 波长差)为 $\Delta\lambda_j$ ($j=1, 2, \dots, n$), 则

$$\Delta\lambda_j = \lambda_{c_j} - \lambda_{i_j} = (2j+1)(\lambda_p - \lambda_s) = (2j+1)\Delta\lambda_p, \quad (11)$$

当温度变化时, PM-FBG 反射谱中心波长将会改变, 那么系统最终输出的 λ_p 与 λ_s 将会漂移。由于 PM-FBG 传感特性, 两峰波长漂移量有所区别, 因此 $\Delta\lambda_p$ 将会改变。假设变化至 $\Delta\lambda'_p$, 则 $\Delta\lambda'_p = \Delta\lambda_p + \Delta$, Δ 为 $\Delta\lambda_p$ 变化量。设 $\Delta\lambda_j$ 变化至 $\Delta\lambda'_j$, 则 $\Delta\lambda'_j = \Delta\lambda_j + \Delta_j$, Δ_j 为 $\Delta\lambda_j$ 的变化量。结合(11)式可得

$$\Delta_j = (2j+1)\Delta\lambda'_p - (2j+1)\Delta\lambda_p = (2j+1)\Delta, \quad (12)$$

定义增敏倍数 N_j ($j=1, 2, \dots, n$) 为

$$N_j = \Delta_j / \Delta = 2j+1, \quad (13)$$

可见, 第 j 阶 FWM 波长差变化量 Δ_j 可将抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 变化量 Δ 放大 $(2j+1)$ 倍, 即增敏 $(2j+1)$ 倍。因此增敏原理实质为利用 FWM 等波长间隔特性叠加抽运波长差, 放大其变化量。

3 实验结果

3.1 实验输出特性分析

进行实验前, 首先将 PM-FBG 裸纤栅区两端用胶带固定在玻璃片上, 保持光栅处于自然伸直状态, 尽量避免弯曲对后续输出特性实验及温度传感实验结果的影响。然后将 PM-FBG 及玻璃片一同置入恒温水浴箱(峥嵘仪器, 型号 YCX-1)内, 使用测温分辨率为 0.1°C 的电子温度计(Tondaj 6802 II)测量内部水温。每次升温操作结束后, 静置实验装置, 当电子温度计示数与水浴锅温度示数相近时进行数

据读取操作, 以此实现 0.1°C 精度控温。

首先利用宽带光源(康冠 ASE 光源, KG-ASE 系列 C 波段)与光谱仪解调方法测得实验使用的 CFBG 及 PM-FBG (20°C 下)的反射谱, 如图 3 所示。图 3(a)中 CFBG 的反射谱特性表现为带宽为 36 nm 的宽带反射, 因此其在 A 结构中可充当全反射镜。图 3(b)中 PM-FBG 的反射谱在 1549.162 nm 及 1549.767 nm 附近有两个反射峰, 每个峰的 3 dB 带宽约为 0.15 nm, 故 PM-FBG 可作为 A 结构的选模器件及传感单元。

在上述分析基础上, 基于图 1 搭建测试系统。

控制水浴箱水温至 20°C 不变, 将光谱仪连接在 A 结构输出位置。待 980 nm 抽运光源稳定输出后, 调节 PC1 控制腔内两波长光的偏振态, 测得光谱如图 4(a)所示(此操作只在每次传感实验开始前输出调控过程中进行, 后续不再调节)。保持 A 结构激光器持续工作 50 min, 每 5 min 采集一次光谱数据, 绘制图 4(b)。然后将 A 结构作为 B 结构光源及传感信息来源与 B 结构相连, 调节 PC2 令 A 结构输出光的偏振态与起偏器偏振主轴的夹角约为 45° , 以此将两束激光的正交偏振态合为同一偏振态。调节 EYDFA 放大输出功率至 23 dBm 进入 HNLF。HNLF 输出光进入 VOA 固定衰减 15 dB 使其功率保持在光谱仪安全输入功率内。连接光谱仪, 观测其输出光谱, 输出光谱如图 4(c)所示。同样保持系统工作 50 min, 每隔 5 min 采集一次光谱, 绘制图 4(d)。

由图 4(a)可见 A 部分光纤激光器传感器装置提供了双波长激光输出。中心波长 λ_s 、 λ_p 分别为 1549.164 nm 和 1549.768 nm, A 部分出光波长差 $\Delta\lambda_p$ 约 0.604 nm。两波长信噪比分别为 48.6 dB 及 47.5 dB。光功率计测得输出总功率约 7 dBm。单

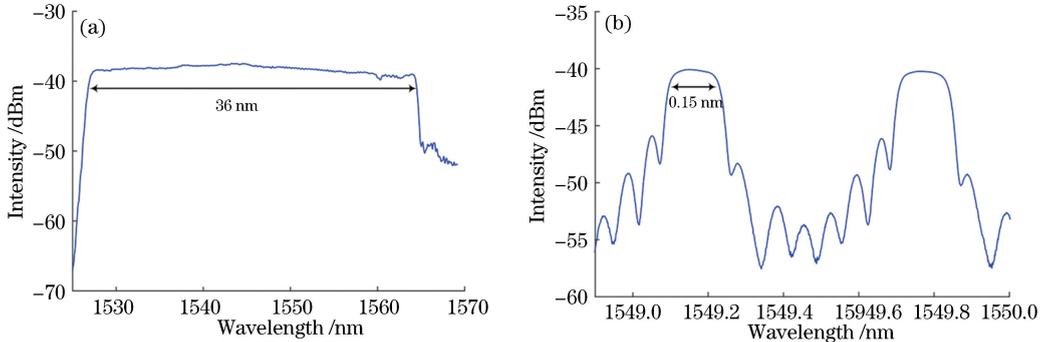


图 3 实验所用光栅反射谱。(a) CFBG 反射谱; (b) PM-FBG 反射谱

Fig. 3 Reflection spectra of grating used in experiment. (a) Reflection spectrum of CFBG; (b) reflection spectrum of PM-FBG

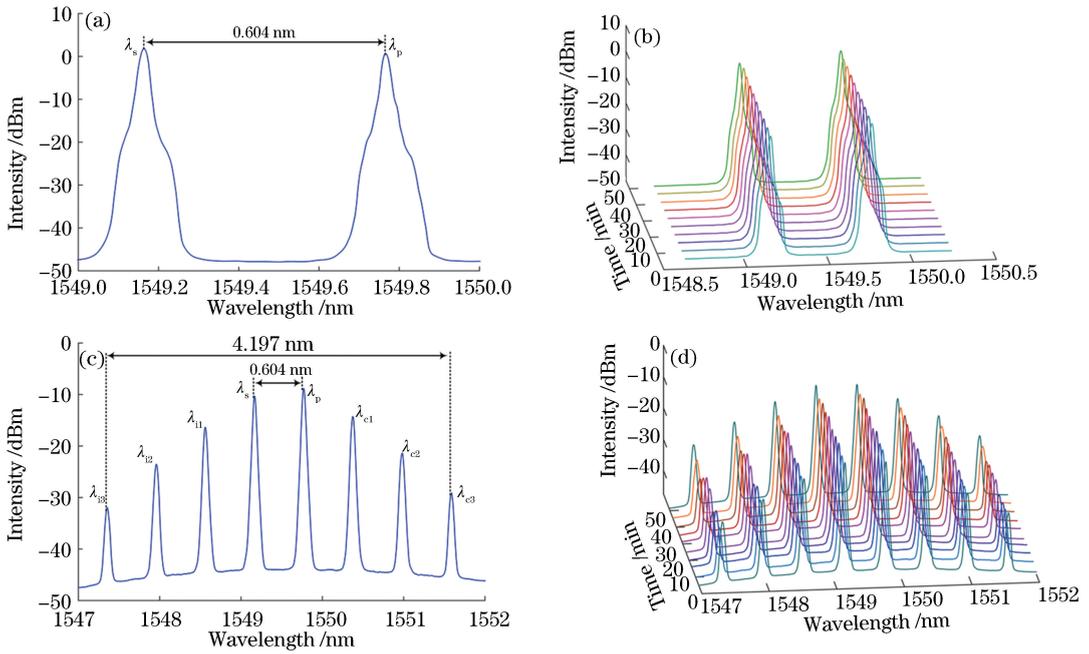


图4 实验输出光谱结果。(a) A传感装置输出光谱;(b) 50 min内A结构输出光谱;(c) B增敏装置输出光谱;(d) 50 min内B结构输出光谱

Fig. 4 Output spectral results of experiment. (a) Output spectrum of section A; (b) output spectrum of section A within 50 min; (c) output spectrum of section B; (d) output spectrum of section B within 50 min

个激光 3 dB 谱宽小于光谱仪分辨率 0.02 nm, 远小于 PM-FBG 单峰带宽。如图 4(b) 所示, 50 min 内, A 结构稳定出光, 功率波动较小, 有利于后续 FWM 稳定产生。由图 4(c) 可知, 增敏后 B 装置可以提供 8 个波长输出, 每个输出光的波长间隔相近, 即实现了 3 阶的 FWM 效应。图 4(c) 中间两峰(峰值功率最高的两峰)为经 HNLF 传输后的 λ_s 、 λ_p , 两侧由近到远分别为低阶到高阶的 FWM 输出: 长波方向为转换光 λ_{c_j} (j 依次为 1, 2, 3); 短波方向为闲频光 λ_{i_j} (j 依次为 1, 2, 3)。每个单激光的谱宽均小于 0.02 nm。第 3 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_3$ 约 4.197 nm, 为 $\Delta\lambda_p$ 的 6.948 倍, 与理论分析一致。在图 4(d) 中可以看到 50 min 内 3 阶 FWM 稳定产生。

3.2 温度传感增敏效果验证实验

为了观测温度改变时增敏后装置输出光谱的漂移情况, 控制水温以 10 °C 为间隔从 20 °C 升至 60 °C, 利用光谱仪平均扫描 50 次(后续实验数据均为平均扫描 50 次后采集的数据)记录整体系统输出光谱漂移情况如图 5(a) 所示。为更直观地对比温度变化对 $\Delta\lambda_p$ 及 $\Delta\lambda_j$ ($j = 1, 2, 3$) 的影响, 选取图 5(a) 中 20 °C 及 60 °C 光谱, 以 4.5 nm 为统一横轴范围(X span), 绘制图 5(b)。如图 5(a) 所示, 升温时各阶闲频光 λ_{i_j} 及转换光 λ_{c_j} 波长对温度的响应趋势与抽运光 λ_p 及信号光 λ_s 一致, 均向长波方向移动,

这也与 PM-FBG 本身对温度的响应趋势相符。但等温度变化下各波长漂移量有所区别, 波长越长的输出光随温度变化的漂移量越小, 即各相邻波长的波长间隔随温度升高都将减小。从图 5(b) 可以看出, 升温 40 °C 后, 相邻波长的间隔减小。抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 从 0.604 nm 减小至 0.580 nm, 变化量 $\Delta(\Delta T = 40 \text{ °C})$ 为 0.24 nm; 第 3 阶闲频光与转换光波长差 $\Delta\lambda_3$ 自 4.197 nm 减小至 4.031 nm, 变化量 $\Delta_3(\Delta T = 40 \text{ °C})$ 为 0.166 nm。 $N_3 = \Delta_3(\Delta T = 40 \text{ °C}) / \Delta(\Delta T = 40 \text{ °C}) = 6.917$, 此结果与(13)式相符。

为了更准确地验证增敏方案的增敏效果, 以 5 °C 为间隔升温 40 °C, 记录 10 组抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 及第 j 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_j$ 数据并进行平均, 重复三次实验后再取平均。利用 MATLAB 拟合工具绘制均值数据得到图 6: 图 6(a)~图 6(d) 依次为抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 对温度响应灵敏度曲线, 以及第 j (j 依次为 1, 2, 3) 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_j$ 对温度响应灵敏度曲线。4 幅图的纵轴范围一致, 均为 0.24 nm, 长宽一致, 因此观测斜率即可比较不同阶数 FWM 波长差的增敏程度。方形标记代表实验数据的均值, 实线代表利用均值拟合得到的传感响应特性曲线。拟合后得到的灵敏度数值及拟合参数记录于表 1, 其中: K_p^T (T 代表温度) 代表抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 的增敏系数; K_j^T ($j = 1, 2, 3$) 为第 j 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_j$

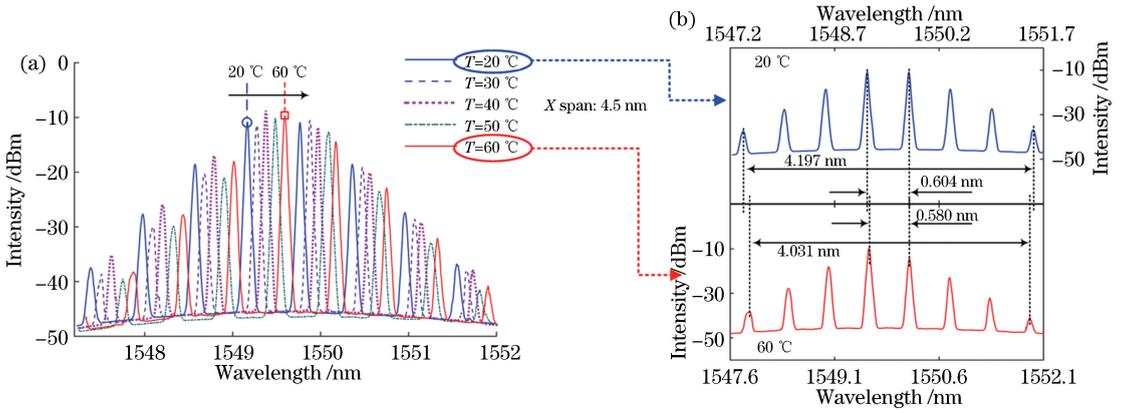


图 5 升温过程中光谱的变化。(a)不同温度下增敏装置输出光谱;(b)波长差变化情况

Fig. 5 Spectral changes in temperature rising. (a) Output spectra of sensitivity-enhancement device at different temperatures; (b) changes in wavelength difference

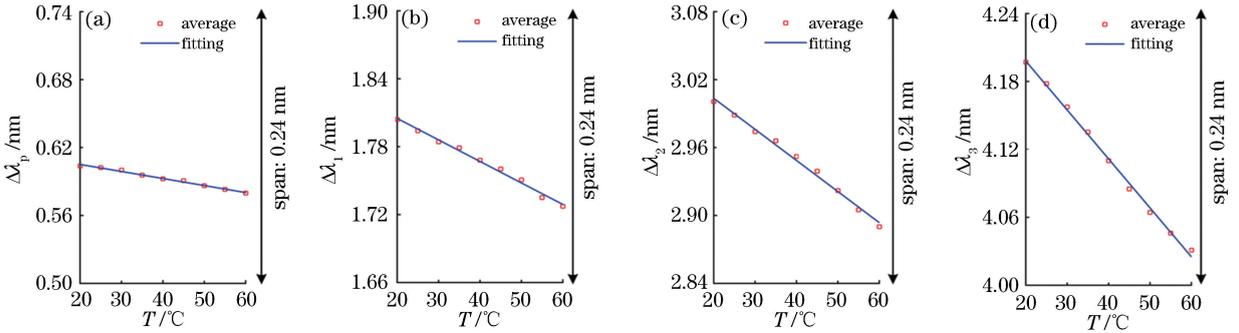


图 6 温度传感响应。(a)抽运波长差 $\Delta\lambda_p$; (b)第 1 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_1$; (c)第 2 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_2$; (d)第 3 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_3$

Fig. 6 Responses of temperature sensing. (a) Pump wavelength difference $\Delta\lambda_p$; (b) 1st-FWM wavelength difference $\Delta\lambda_1$; (c) 2nd-FWM wavelength difference $\Delta\lambda_2$; (d) 3rd-FWM wavelength difference $\Delta\lambda_3$

表 1 4 种波长差对温度的响应灵敏度及拟合曲线的拟合参数

Table 1 Temperature sensitivities for four types of wavelength differences and parameters for their fitting curves

Types of wavelength differences	Temperature sensitivity K_p^T or $K_j^T / (\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	R^2	SSE / 10^{-6}
$\Delta\lambda_p$	-0.6211	0.9911	5.210
$\Delta\lambda_1$	-1.8990	0.9920	43.43
$\Delta\lambda_2$	-2.7470	0.9933	76.50
$\Delta\lambda_3$	-4.3220	0.9967	93.77

的温敏系数; R^2 代表拟合判定系数; SSE 代表拟合的和方差。

由图 6 可以直观地看出, 4 种波长差对温度传感响应均表现为线性, 随着温度升高, 波长差均呈减小趋势。FWM 阶数越高, 叠加的波长差越多, 同温度变化下波长差改变量越大, 因此拟合曲线斜率越大。由表 1 可以看出, 图 6 中 4 幅图的 R^2 均在 0.99 以上, 且和方差均接近于 0, 表明线性度良好。抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 温度灵敏度系数 K_p^T 为 $-0.6211 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 此数值即未增敏 PM-FBG 传感器的温度灵敏度。

第 1 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_1$ 至第 3 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_3$ 的温度灵敏度分别为 $-1.8990, -2.7470, -4.3220 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。以抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 温度灵敏度系数为分母, 利用 $N_j = K_j^T / K_p^T$ 计算 $j = 1, 2, 3$ 时实验测得的增敏倍数, 分别为 3.05, 4.44, 6.95, 此结果存在些许误差, 但与理论分析接近。故可以认为此增敏方案增敏后的灵敏度可表示为 $K_{\text{after}} = N_j K_{\text{before}} = (2j + 1) K_{\text{before}}$, 其中, K_{before} 为增敏前的传感器灵敏度。

光谱仪分辨率一般为 0.02 nm , 则未增敏 PM-

FBG 传感器温度分辨率为光谱仪分辨率与其温度灵敏度 ($-0.6211 \text{ pm}/^\circ\text{C}$) 的比值, 即 $33 \text{ }^\circ\text{C}$ 。增敏后, 第 3 阶 FWM 波长差温度灵敏度提升至 $-4.3220 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 因此计算得到温度分辨率为 $4.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。未增敏前, 温度变化 $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 波长间隔从 0.604 nm 变为 0.58 nm , 变化量仅 0.024 nm , 刚超过光谱仪的分辨率。增敏后, 温度变化 $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 波长间隔从 4.197 nm 变为 4.031 nm , 变化量提升至 0.166 nm , 远高于光谱仪分辨率。

3.3 增敏结构对轴向应力传感特性影响

PM-FBG 常用于解决 FBG 温度-应变交叉敏感问题, 但 PM-FBG 本身对轴向应力(应变)传感灵敏度较低。为了验证 FWM 增敏方案对 PM-FBG 传感器轴向应力传感特性的影响, 在完成温度传感实验后, 搭建实验结构, 进行轴向应力实验, 实验光路结构与图 1 一致。

在实验室环境下进行 FBG 应力或应变实验的常用方法有横梁臂法、位移法及利用应变片封装等。除了位移法是直接施加应变外, 其他方法都为利用材料形变将应变转移到 FBG 上。考虑到实验室条件及 PM-FBG 的完整封装保存, 本文轴向应力实验采取应变片间接传导应变的方法。所用应变片^[22]材质是 304 钢(弹性模量约 200 GPa), 结构引自 MOI 公司应力计封装, 栅区黏连点相距 9 cm , 宽

2 cm , 厚度为 1 mm 。粘贴时先将 PM-FBG 一端与应变片黏连固定好后, 静待 SY-40 胶彻底固化后垂直悬挂应变片, 在 PM-FBG 另一端悬挂 200 g 重物后再进行黏连固定, 目的是为其施加预应力, 消除光纤中的内应力余量。封装后 PM-FBG 结构如图 7 所示。

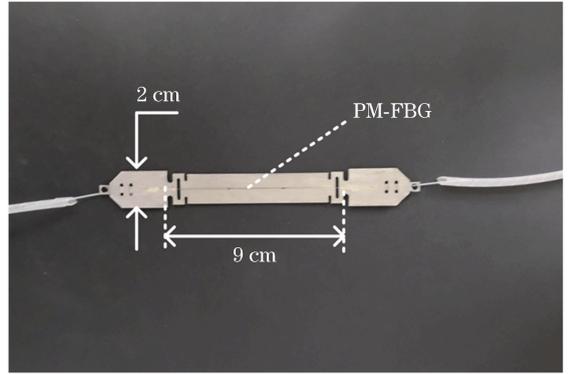


图 7 PM-FBG 封装结构

Fig. 7 Package structure of PM-FBG

为验证封装情况, 利用夹具垂直于地面固定应变片, 在另一端悬挂 100 g 砝码对光栅施加约 1 N 的应力, 加挂砝码使应力从 0 N 升至 20 N , 光谱漂移如图 8(a) 所示。多次记录抽运光 λ_p 与信号光 λ_s 的中心波长数据, 数据平均后绘制图 8(b), 其中: $K_{\lambda_p}^S$ 代表波长 λ_p 对轴向应力的灵敏度; $K_{\lambda_s}^S$ 代表波长 λ_s 对轴向应力的灵敏度。

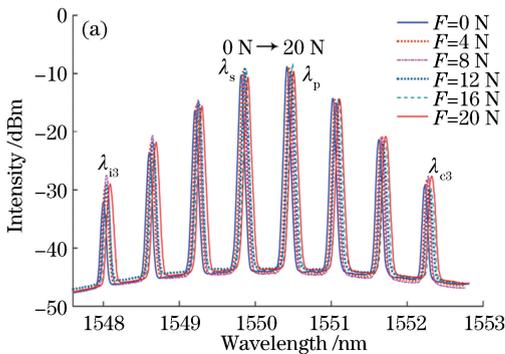
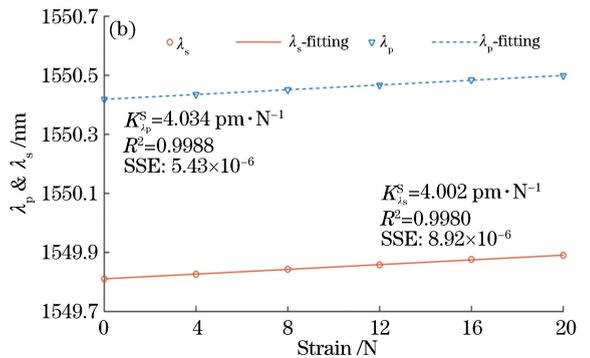


图 8 输出波长对轴向应力的响应。(a) 不同轴向应力下系统输出光谱; (b) λ_p 、 λ_s 与轴向应力关系

Fig. 8 Responses of output wavelength to axial strain. (a) Output spectra of system at different strains;

(b) λ_p and λ_s as functions of axial strain



由图 8(a) 可以看出, 随着力的增大, 应变片拉伸将应变传导至 PM-FBG 上, B 系统输出的所有波长均向长波方向连续漂移。由图 8(b) 可以看出, 抽运光 λ_p 与信号光 λ_s 两波长对轴向应力的响应均为线性, 其 R^2 均在 0.998 以上, 且接近于 1 , SSE 在 10^{-6} 量级, 接近于 0 , 此拟合程度可证明封装是有效的。因测试方法限制, 具体的应变与应力单位不仅

与应变片结构参数有关, 而且与封装工艺精度有关。本文着眼于增敏倍数研究, 因此将轴向应力灵敏度单位定为 pm/N , 用以对比增敏前后灵敏度的数值。

为了更直观地观测增敏系统对 PM-FBG 激光器传感器轴向应力传感特性的影响情况, 重复实验记录 λ_p 、 λ_s 的波长差 $\Delta\lambda_p$ 数据, 数据平均后绘制图 9(a)。同时记录 λ_{13} 、 λ_{c3} 的波长差 $\Delta\lambda_3$ 的数据, 数据

平均后绘制图 9(b)。图 9(a)与图 9(b)的纵轴范围一致,均为 0.012 nm。图 9 中: K_p^S 代表抽运波长差

$\Delta\lambda_p$ 的轴向应力灵敏度系数; K_3^S 代表为第 3 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_3$ 的轴向应力灵敏度系数。

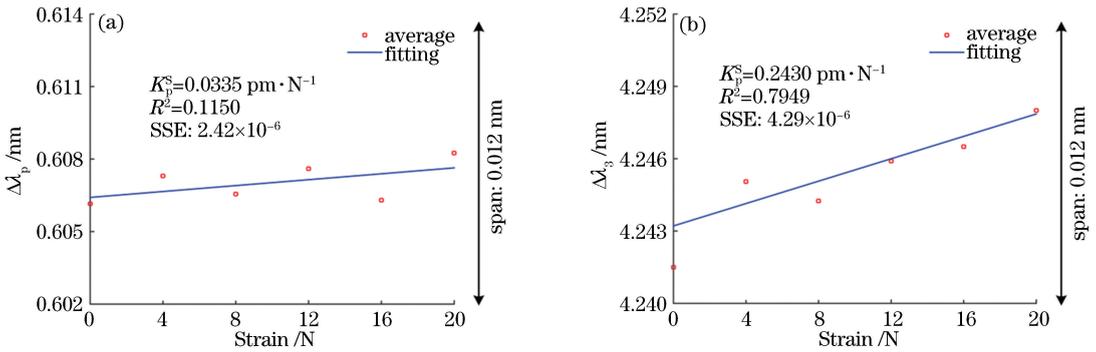


图 9 轴向应力响应。(a)抽运波长差 $\Delta\lambda_p$; (b)第 3 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_3$

Fig. 9 Responses of axial strain. (a) Pump wavelength difference $\Delta\lambda_p$; (b) 3rd-FWM wavelength difference $\Delta\lambda_3$

由图 9(a)可知:未增敏时 PM-FBG 激光传感器的波长差 $\Delta\lambda_p$ 随轴向应力的增大呈轻微增大的趋势,平均数据在拟合曲线上浮动; R^2 值为 0.1150,和方差 SSE 值接近 0,这是由 PM-FBG 对轴向应力灵敏度较低及光谱仪分辨率受限引起的。但结合图 8(b)中两波长灵敏度的差值可确定其波长差灵敏度在 0.03 $\mu\text{m}/\text{N}$ 附近。由图 9(b)可知:第 3 阶 FWM 增敏后,20 N 应力作用下其数值改变量增大,使其拟合曲线斜率变大; R^2 为 0.7949, SSE 仍接近于 0,拟合程度得到很大提升。

综合以上实验结果可见,3 阶 FWM 波长差 $\Delta\lambda_3$ 对轴向应力的响应表现较抽运波长差 $\Delta\lambda_p$ 更明显,说明 FWM 增敏方案对 PM-FBG 激光传感器的轴向应力传感特性同样有增敏效果。在光谱仪分辨率下,原本低敏的传感特征经过 FWM 处理后表现出明显的灵敏度响应增加趋势。

结合 FWM 增敏原理及温度传感的实验结论可知,增敏方案增敏后的灵敏度 $K_{\text{after}} = (2j + 1) \cdot K_{\text{before}}$,增敏后的最终传感灵敏度与增敏倍数及增敏对象的固有传感灵敏度有关。本文实现了 3 阶 FWM 增敏,增敏倍数接近 7 倍。但由于 PM-FBG 的波长差对轴向应力的特殊传感特性,增敏后的传感灵敏度仍会受 PM-FBG 固有灵敏度的限制。

4 结 论

将 FWM 效应与 PM-FBG 双波长激光器传感方案相结合,提出一种基于光学波长转换的高倍数增敏方案。通过温度传感实验验证了该增敏方案的增敏倍数只与 FWM 效应产生的阶数有关的结论。实验过程中产生了 3 阶的 FWM 效应,温度实验证明其对应增敏倍数为 6.95 倍,在光谱仪的 0.02 nm

分辨率下,PM-FBG 传感器温度传感分辨率实现了从 33 $^{\circ}\text{C}$ 到 4.7 $^{\circ}\text{C}$ 的提升,增敏近 7 倍;轴向应力实验证明增敏方案对低敏的传感参量同样有增敏效果,但最终传感灵敏度会受限于增敏对象的固有传感特性。因此,使用该增敏辅助装置传感器的最终传感灵敏度数值与 FWM 阶数(增敏倍数)及增敏前传感灵敏度(灵敏度基底)有关。本方法与 FBG 增敏加工方案具有良好的兼容性。为提高本文方案的稳定性,光纤激光器谐振腔可采用超短腔结构抑制多模谐振;为节约成本,可利用低成本的色散位移光纤代替 HNLF。

参 考 文 献

- [1] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.
- [2] Zhang B W, Kahrizi M. High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(4): 586-591.
- [3] Fu H, Xie S, Xu Y S, *et al.* Application research of optical fiber Bragg grating sensing technology in the tunnel fire monitoring[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(1): 133-137.
付华, 谢森, 徐耀松, 等. 光纤布拉格光栅传感技术在隧道火灾监测中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 133-137.
- [4] Wei Y, Jiao M X. Experimental study on the sensing characteristics of polarization-maintaining fiber Bragg grating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s1): 107-110.
魏颖, 焦明星. 保偏光纤 Bragg 光栅传感特性的实验

- 研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s1): 107-110.
- [5] Miao F, Jiang M S, Sui Q M, *et al.* Sensing characteristics analysis of polarization-maintaining fiber Bragg grating [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(3): 45-47.
苗飞, 姜明顺, 隋青美, 等. 保偏布喇格光纤光栅传感特性研究[J]. *光通信技术*, 2012, 36(3): 45-47.
- [6] Wang W, Meng Z, Yang H Y. The research of temperature and pressure sensing characteristics on PMFBG[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(2): 35-38.
王伟, 孟洲, 杨华勇. 熊猫型保偏光纤光栅温度和压力传感特性的实验研究[J]. *光学与光电技术*, 2007, 5(2): 35-38.
- [7] Sun S Q, Chu F H, Lu J Y. Progress in cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 040006.
孙诗晴, 初凤红, 卢家焱. 光纤布拉格光栅传感器交叉敏感问题的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 040006.
- [8] Li Z Y, Zhou Z D, Tong X L, *et al.* Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306007.
- [9] Xu O, Fu X S. Temperature-insensitive method for interrogating fiber grating sensor using dual phase-shifted fiber grating and optoelectronic oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 150601.
许鸥, 符瑕珊. 基于双相移光纤光栅的光电多频振荡生成及温度不敏感传感解调方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 150601.
- [10] Yao J P. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3489-3497.
- [11] An J, Wang Y J, Li F, *et al.* Highly sensitive LPG temperature sensor employing polyamic acid-coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0822002.
安佳, 王永杰, 李芳, 等. 采用聚酰胺酸层的高灵敏度长周期光纤光栅温度传感器[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0822002.
- [12] Carroll K E, Zhang C, Webb D J, *et al.* Thermal response of Bragg gratings in PMMA microstructured optical fibers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(14): 8844-8850.
- [13] Hou S B, Xie T, Li C. Differential FBG tilt sensor based on leverage sensitization structure [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(5): 91-93.
侯赛邦, 谢涛, 李川. 差动式杠杆增敏结构FBG倾角传感器[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(5): 91-93.
- [14] Du J B, He Z Y. Sensitivity enhanced strain and temperature measurements based on FBG and frequency chirp magnification [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27111-27118.
- [15] Du J B, Fan X Y, Liu Q W, *et al.* Strain sensitivity enhancement for FBG sensors by all-optical frequency chirp magnification with high-order cascaded FWM [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91572V.
- [16] Li L, Du J B, Fan X Y, *et al.* Ultra-highly sensitive FBG sensor assisted by optical parametric amplification and high-order FWM [C]//Asia Communications and Photonics Conference 2014, November 11-14, 2014, Shanghai, China. Washington, D. C.: OSA, 2014: ATTh11.10.
- [17] Zhao X L, Zhang Y M, Yang R T, *et al.* High-temperature fiber laser sensing based on low-reflectivity regenerated fiber Bragg grating and saturable absorber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060605.
赵小丽, 张钰民, 杨润涛, 等. 基于再生低反射率光纤光栅和饱和吸收体的高温光纤激光传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060605.
- [18] Li C S, Yan B B, Wang D P, *et al.* Fiber Bragg grating sensing by ultra-broadband light source based on bismuth-erbium co-doped fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110003.
李春生, 颜盼盼, 王大朋, 等. 基于超宽带铋铒共掺光纤光源的光纤光栅传感[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0110003.
- [19] Liu X, Liu Y G, Liang X, *et al.* Study on high temperature and strain sensing characteristics of polarization maintaining fiber grating [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2018, 40(1): 64-67, 72.
刘鑫, 刘颖刚, 梁星, 等. 保偏光纤光栅高温及应力传感特性研究[J]. *压电与声光*, 2018, 40(1): 64-67, 72.
- [20] Zhu M S, Murayama H, Daichi W D, *et al.* Dependence of measurement accuracy on the birefringence of PANDA fiber Bragg gratings in

- distributed simultaneous strain and temperature sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4000-4017.
- [21] Yin X L, Cheng X M, Fei K, *et al.* Four-wave mixing in a polarization-maintaining fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(11): 1232-1235.
- [22] Li Z Y. Optimum design of fiber Bragg grating demodulator based on tunable F-P cavity [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018: 17-19.
- 李忠玉. 基于可调谐 F-P 腔的光纤光栅解调仪的优化设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 17-19.