

# 基于保偏光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的温度不敏感压力传感技术

杨远洪<sup>1</sup>, 刘硕<sup>1</sup>, 陆林<sup>1</sup>, 靳伟<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;  
2. 香港理工大学 电机工程系, 香港 999077)

**摘要:** 分析和仿真了含两段保偏光纤的光纤 Sagnac 干涉仪输出光谱特性, 获得消除两段双折射光纤交叉敏感的条件。提出了一种基于保偏光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的温度不敏感压力传感技术。采用实心保偏光子晶体光纤作为传感光纤, 搭建了基于双段保偏光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的侧向压力传感系统, 分别进行侧向压力测试及温度影响实验。实验结果表明, 侧向压力灵敏度可以达到的 0.287 7 nm/N, 同时由温度变化引起的漂移量小于 0.1 pm/°C。

**关键词:** Sagnac 干涉仪; 压力传感; 保偏光纤; 保偏光子晶体光纤; 温度

**中图分类号:** TB133    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0802002

## Temperature-insensitive pressure sensing technology based on polarization maintaining photonic crystal fiber Sagnac interferometer

Yang Yuanhong<sup>1</sup>, Liu Shuo<sup>1</sup>, Lu Lin<sup>1</sup>, Jin Wei<sup>2</sup>

(1. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;  
2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** The transmission spectrum characteristic of two-segment polarization maintaining fibers Sagnac interferometer was investigated and simulated in detail and the optimal parameters for eliminating the crosstalk between the two polarization maintaining fibers was obtained. A temperature-insensitive pressure sensing technology was proposed. An experimental Sagnac interferometer was built and the solid core polarization maintaining photonic crystal fibers were taken as the sensing probe. The side pressure sensitive coefficients and the temperature crosstalk drift were measured and compared. The experimental results show that the side pressure sensitive coefficient was about 0.287 7 nm/N and the temperature drift was less than 0.1 pm/°C.

**Key words:** Sagnac interferometer; pressure sensing; polarization maintaining fiber;  
polarization maintaining photonic crystal fiber; temperature

收稿日期: 2016-08-05; 修訂日期: 2016-08-19

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504); 航空科学基金(20140851012); 创新团队发展计划(IRT 1203)

作者简介: 杨远洪(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。Email:yhyang@buaa.edu.cn

## 0 引言

在保偏光纤 Sagnac 干涉仪中, 沿相反方向传播的两束光波在闭合环路绕行一周, 由于保偏光纤(PMF)的双折射效应, 两束光波之间产生光程差, 进而可形成稳定的干涉光谱输出。因此, 通过跟踪输出光谱的变化特征, 便可实现对引起双折射大小变化的物理量, 如压力、温度、应变的传感<sup>[1-3]</sup>。然而, 在此类传感中, 由交叉敏感, 特别是由外界温度变化引起的扰动是限制非温度量测量性能的主要障碍。Do-Hyun Kim 等人<sup>[4]</sup>利用保偏光子晶体光纤(PM-PCF)建立 Sagnac 干涉仪传感器, 验证了其具有较低的温度灵敏度。J. Shi 等人<sup>[5]</sup>利用两个 Sagnac 干涉仪并联的结构, 实现了温度和应变的同时测量。与此同时, 含有若干段保偏光纤以及一些偏振控制器(PC)的混合光纤 Sagnac 干涉仪结构引起了广泛的注意, 其具有制作简单, 灵活性高, 稳定性好等诸多优势<sup>[6]</sup>。Y. Liu 等人<sup>[7]</sup>给出了有关此类系统的概述, 同时给出了其在光纤传感领域的一些应用。G. Sun 等人采用含有两种不同种类 PMF 的结构, 提出了一种温度和应

$$I = \left[ \cos \frac{(\phi_1 + \phi_2)}{2} \sin(\theta_1 + \theta_3) \cos \theta_2 + \cos \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{2} \cos(\theta_1 + \theta_3) \sin \theta_2 \right]^2 \quad (1)$$

$$\phi_i = 2\pi B_i L_i / \lambda_i, \quad i=1, 2$$

式中:  $\phi_i$  为每段 PMF 中两偏振模式间的相位差;  $B_i$ ,  $L_i$  分别为各段 PMF 的双折射和长度;  $\lambda_i$  为工作波长。 $\theta_1$  和  $\theta_3$  为入射光(或出射光)偏振方向与相应 PMF 慢轴之间的夹角, 可以通过旋转 PC 的偏振片进行调节。 $\theta_2$  是在熔接点处两段 PMF 的慢轴之间的夹角, 可在熔接时预设置。对于双段 PMF 的 Sagnac 系统, 其干涉式中包含四个相位项, 分别是:  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_1 - \phi_2$  和  $\phi_1 + \phi_2$ 。因此将公式(1)展开成如下形式:

$$I = \left[ \sin(\theta_1 + \theta_3 + \theta_2) \cos \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \cos \left( \frac{\phi_2}{2} \right) - \sin(\theta_1 + \theta_3 - \theta_2) \sin \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \sin \left( \frac{\phi_2}{2} \right) \right]^2 \quad (4)$$

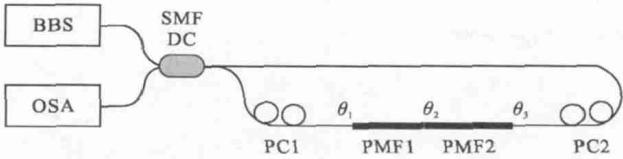


图 1 保偏光纤 Sagnac 干涉仪的原理示意图

Fig.1 Schematic illustration of the PMF Sagnac interferometer

由公式(4)可知, 当设置角度  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  和  $\theta_3$  为特定值时, 可使  $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$  或  $\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3)$  的值为零, 这

变同时测量的方案<sup>[8]</sup>。

在文中, 基于多段保偏光纤 Sagnac 干涉仪结构, 提出了一种温度不敏感的压力传感方案。文中对双段保偏光纤 Sagnac 系统的干涉光谱特征进行了详细地理论分析和仿真研究。将两段实心的 PM-PCF 引入到闭合环路中, 搭建了一个 Sagnac 干涉仪压力传感实验装置。实验研究了该系统对侧向压力的测量灵敏度及温度变化引起的漂移。

## 1 原理

图 1 为两段保偏光纤 Sagnac 干涉仪系统的原理示意图。该系统由宽谱光源(BBS), 单模光纤耦合器(SMF DC), 两个用来调节传感光纤两端偏振态的偏振控制器(PC1 和 PC2), 两段长度分别为  $L_1$ ,  $L_2$  的 PMF, 以及光谱分析仪(OSA)组成。从宽谱光源发出的光经 SMF DC 后分成两路分别沿顺时针和逆时针方向绕光纤环传输, 沿相反方向传输的两束光在 DC 处再次汇合, 并在两个偏振模式间产生干涉。干涉光谱由 OSA 检测并记录。图 2 所示为一个典型实测干涉光谱, 在一个周期内有四个极小值。其输出干涉谱可用下式描述<sup>[8]</sup>:

$$I = \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\phi_1 + \phi_2) \right] \sin^2(\theta_1 + \theta_3) \cos^2 \theta_2 + \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \right] \cos^2(\theta_1 + \theta_3) \sin^2 \theta_2 + [\cos(\phi_1) + \cos(\phi_2)] \sin(\theta_1 + \theta_3) \cos(\theta_1 + \theta_3) \cdot \cos \theta_2 \sin \theta_2 \quad (3)$$

如图 2 所示, 在输出干涉谱每个周期中有四个波谷, 其所对应的极小值波长便是四种相位分量相互叠加的结果。为了更好地表示 Sagnac 系统中每段 PMF 的作用, 还可将上式改写为如下形式:

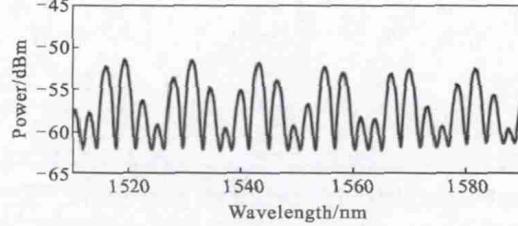


图 2 一个典型的实测输出干涉光谱

Fig.2 Typical output spectrum recorded experimentally

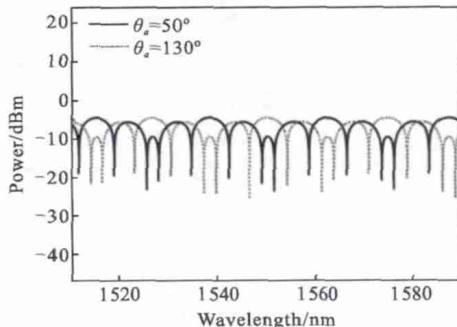
基于公式(1)~(3),对输出干涉谱进行了仿真研究,仿真参数设置如表1所示。由于可以通过旋转两个PC的偏振片来分别调节 $\theta_1$ 和 $\theta_3$ 的大小,这里用 $\theta_a$ 来表示 $\theta_1$ 和 $\theta_3$ 的和。当 $\theta_a$ 为50°、 $\theta_2$ 为45°时,可以获得较大的条纹对比度。为了使得干涉时四个相位项不同且等间隔,将PMF1和PMF2的长度分别设为20 cm和60 cm,双折射均设为 $9\times10^{-4}$ 。

表1 仿真参数设置

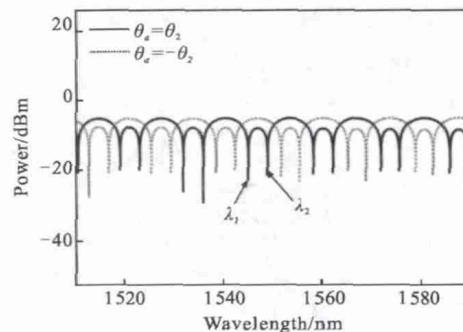
Tab.1 Simulation parameters

$\theta_a$	$\theta_2$	$L_1$	$L_2$	$B_1$	$B_2$
50°	45°	20 cm	60 cm	$9\times10^{-4}$	$9\times10^{-4}$
130°					

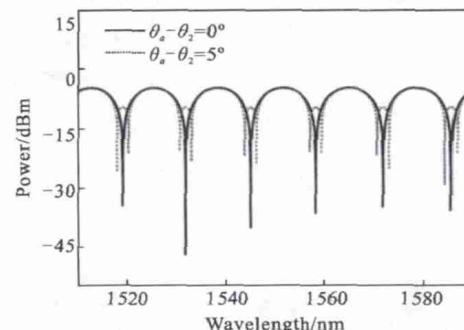
仿真所得干涉谱如图3所示,与图1实际干涉谱类似。调整 $\theta_a$ 为不同角度值,如13°,波谷波长将随之移动,表明干涉谱中每一个极值波长均是四个相位项综合叠加作用的结果。

图3 不同 $\theta_a$ 下的仿真干涉谱Fig.3 Simulated interference spectrum with different  $\theta_a$ 

由公式(4)可知,当 $\theta_a-\theta_2=0$ 或 $\theta_a+\theta_2=0$ 时,干涉输出中将仅剩两个极小值,分别对应相位项 $\phi_1$ (由PMF1决定)或相位项 $\phi_2$ (由PMF2决定)。设 $\theta_2=45^\circ$ , $L_1=L_2=20\text{ cm}$ , $B_1=B_2=9\times10^{-4}$ , $\theta_a$ 分别取45°和-45°,可以得到如图4所示的两条干涉谱,两干涉谱间相位差为 $\pi$ ,两干涉谱中的各个波谷波长均只与相位项 $\phi_1$ 或相位项 $\phi_2$ 相关,与公式(4)描述的情况一致。仿真表明,当 $\theta_a-\theta_2=0$ 或 $\theta_a+\theta_2=0$ 时,PMF1和PMF2光纤段的双折射(或长度)变化将分别引起图3中波谷波长 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的移动。由于压力、应变、温度均可调制PMF的双折射和长度参数,因此,通过解调波谷波长的移动可以实现对压力、应变、温度等的传感测量。

图4 当 $\theta_a+\theta_2=0$ 和 $\theta_a-\theta_2=0$ 时的仿真干涉谱Fig.4 Simulated interference spectrum when  $\theta_a+\theta_2=0$  and  $\theta_a-\theta_2=0$  respectively

作为对比,设 $\theta_a-\theta_2\neq0$ 和(或) $\theta_a+\theta_2\neq0$ ,即一般情况下,可得到图5所示的输出光谱,由于公式(5)输出中存在叉项,波谷波长与 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 均相关。这说明,要实现两段保偏光纤独立敏感物理量,必须保证 $\theta_a-\theta_2=0$ 或 $\theta_a+\theta_2=0$ 。

图5  $\theta_a-\theta_2$ 分别为0°和5°时的干涉谱Fig.5 Interference spectrum when  $\theta_a-\theta_2=0$  and 5° respectively

当在光纤段PMF2上施加压力或者应变时,将会使得它的双折射和(或)长度值发生改变并引起波谷波长的移动。通过仔细旋转调节两个PC的偏振片,可使得 $\theta_a-\theta_2=0$ 或 $\theta_a+\theta_2=0$ ,此时将只有 $\lambda_2$ 随压力或应变作用发生移动。因此,通过跟踪 $\lambda_2$ 的移动,便可实现对压力或应变的传感。保持光纤段PMF1不受压力或应变作用, $\lambda_1$ 将会保持稳定并可将其作为参照。从同一光纤环上截取PMF1和PMF2,长度均为 $L_1=L_2=20\text{ cm}$ 。当在PMF2上加载侧向压力时,假定其双折射从 $9.00\times10^{-4}$ 变化到 $9.03\times10^{-4}$ ,步长为 $1\times10^{-6}$ ,可仿真得到此过程中 $\lambda_2$ 的移动情况,如图6所示。压力与波谷波长呈线性关系,其传感关系可简单描述为如下式:

$$y=k\cdot(\lambda_2-\lambda_1)+y_0 \quad (5)$$

式中: $y$ 为压力; $k$ 为常值系数; $y_0$ 为零位偏置。由于

两段 PMF 为同种光纤,故两种波谷波长具有相同的温度系数,因此由外界环境温度变化而引起的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的移动是相同的,即不会对压力或应变的传感引入误差。因此,可得到一种温度不敏感的压力传感技术。

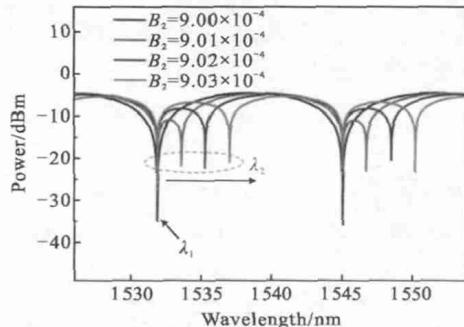


图 6 不同双折射值时的干涉谱

Fig.6 Interference spectrum with different birefringence

## 2 实验

基于图 1 所示原理,为获得极低的温度敏感性,将两段实心的 PM-PCF 作为传感头,接入 Sagnac 干涉仪,形成图 7 所示实验系统,其实物图如图 8 所示。实验中选用光谱解调仪(MICRON OPTICS SM-125,波长分辨率约为 1 pm)测量输出干涉谱。为了消除温度变化引起的扰动,选取的 PM-PCF1 和 PM-PCF2 光纤段长度相等,均为 18 cm。两段 PM-PCF 的双折射值均为  $9.8 \times 10^{-4}$ 。将两段光纤进行 45°熔接,即二者慢轴间的夹角为 45°。

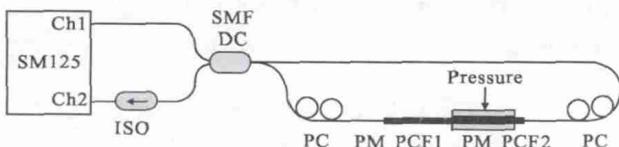


图 7 实验装置原理示意图

Fig.7 Schematic of experimental setup

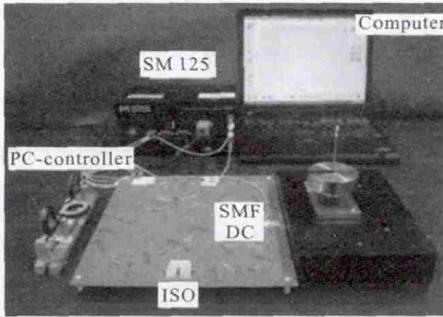


图 8 实验装置实物图

Fig.8 Photograph of the experimental setup

进行侧向压力加载实验时,将受压光纤段按照

图 9 所示方式放置在两块不锈钢板之间,并采用参考文献[9]的方法仔细调节偏振轴向,使光纤的慢轴方向与钢板平面正交。选用一系列砝码进行压力加载实验,加载范围为 0~30 N,间隔为 5 N。在每个载荷下记录波谷波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的移动情况。粗调  $\theta_a$ ,使  $\theta_a - \theta_2 \approx 0$ ,得到的输出干涉谱(典型部分)如图 10 所示,可以看到,当加载压力时,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  均会产生一定的移动。对  $\theta_a$  进行精调,使得  $\theta_a - \theta_2 = 0$ ,此时的输出干涉谱(典型部分)如图 11 所示,可以看到,此时只有  $\lambda_2$  随加载压力的增大而移动,  $\lambda_1$  则保持不动。计算波长差,可得到  $\Delta\lambda$  与压力线型曲线,如图 12 所示,压力灵敏度系数约为 0.2877 nm/N。实验结果与仿真相吻合。

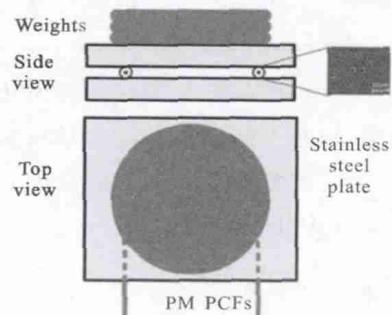
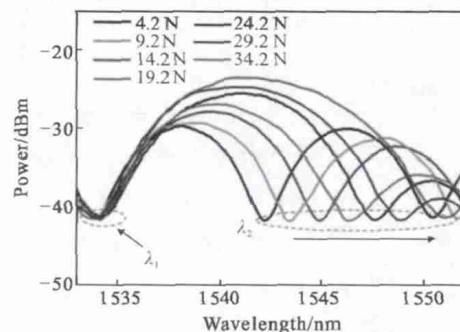
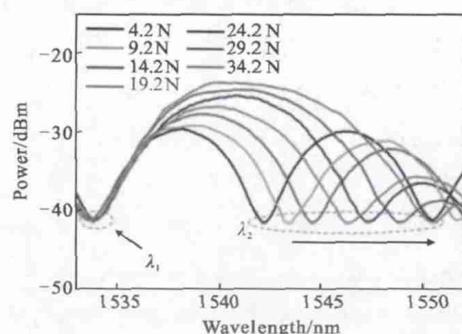


图 9 压力加载装置示意图

Fig.9 Schematic of pressure loading setup

图 10 当  $\theta_a - \theta_2 \approx 0$  时,不同压力下的干涉谱Fig.10 Interference spectrum under different pressures when  $\theta_a - \theta_2 \approx 0$ 图 11 当  $\theta_a - \theta_2 = 0$  时,不同压力下的干涉谱Fig.11 Interference spectrum under different pressures when  $\theta_a - \theta_2 = 0$

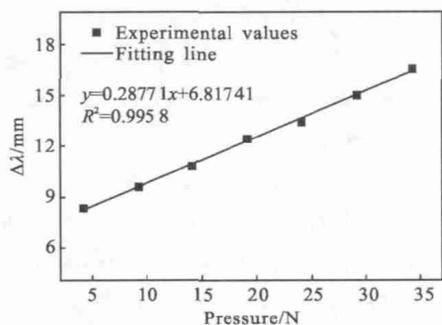


图 12 实验测量结果曲线

Fig.12 Curve of experiment measured results

为了研究温度串扰误差,将系统的压力传感段放入一个温箱中进行实验。实验装置的原理示意图和实物图分别如图 13 和图 14 所示。实验中温度范围为-40~60 °C,间隔为 20 °C,将加载的压力固定为 4.2 N。记录波谷波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的移动,并计算二者的差  $\Delta\lambda$ 。不同温度下的输出干涉谱如图 15 所示。 $\Delta\lambda$

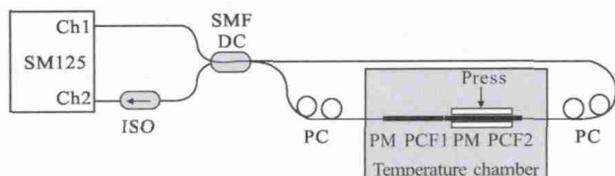


图 13 温度实验装置原理示意图

Fig.13 Schematic of the temperature experimental setup

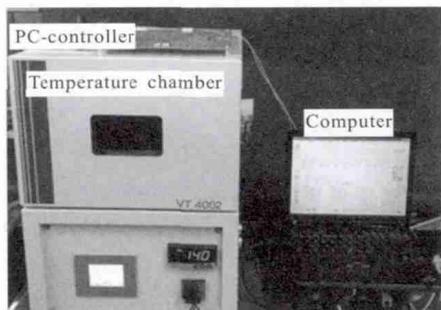


图 14 温度实验装置实物图

Fig.14 Photograph of the temperature experimental setup

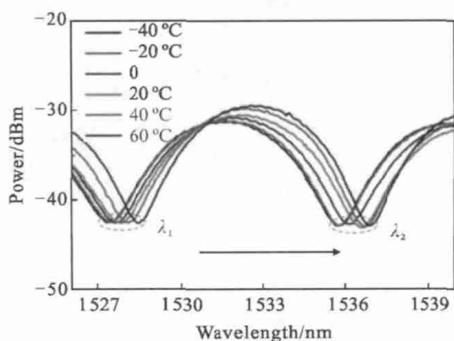
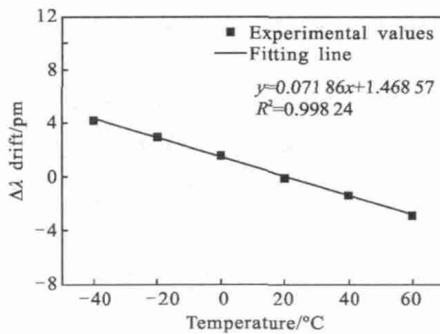


图 15 不同温度下的输出干涉谱

Fig.15 Output interference spectrum under different temperatures

的平均值约为 8.33 nm,温度引起的波长差  $\Delta\lambda$  的漂移量如图 16 所示。线性拟合可得,残余温度系数为-0.072 pm/°C。在-40~60 °C的温度范围内,外界温度变化引起的波长波动约为 7.2 pm,小于  $\Delta\lambda$  的千分之一,可认为温度对系统没有影响。

图 16 温度引起的波长差  $\Delta\lambda$  的漂移Fig.16 Wavelength difference drift  $\Delta\lambda$  due to temperature

### 3 结 论

文中提出并实现了一种基于保偏光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的温度不敏感压力传感。理论仿真和实验研究表明,通过光路优化调节,使  $\theta_a-\theta_2=0$  或  $\theta_a+\theta_2=0$ ,可消除两段保偏光纤干涉谱的交叉项,进而实现独立的敏感测量。实验结果表明,压力传感器的侧向压力灵敏度约为 0.2877 nm/N,与此同时,双段 Sagnac 系统中由温度变化(-40~60 °C)引起的漂移量波长波动约为 7.2 pm,小于  $\Delta\lambda$  的千分之一,实现了温度不敏感压力测量。

### 参考文献:

- [1] David Schaafsma, Gail Palmer, Bechtel James H. Fiber optic temperature sensors for medical applications[C]//SPIE, 2003, 4957: 162-169.
- [2] Bock Wojtek J. High-pressure polarimetric sensor using birefringent optical fibers [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1990, 39(1): 233-237.
- [3] Yang Yuanhong, Duan Weiqian, Gao Lijuan. Field calibration method for the reflection-type polarization maintain optic fiber temperature sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2107-2111. (in Chinese)
- [4] 杨远洪, 段纬倩, 高丽娟. 反射型保偏光纤温度传感器现场校准方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2107-2111.
- [5] Kim D H, Jin K. Sagnac loop interferometer based on

- polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity [J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4490–4495.
- [5] Shi J, Xiao S, Yi L, et al. Temperature and strain discrimination using two parallel connected Sagnac loops based on character-1 shaped polarization-maintaining fiber [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(4): 418–420.
- [6] Kim B H, Lee S H, Lin A, et al. Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1789–1794.
- [7] Liu A Y, Liu B, Zhou G, et al. Investigation on transmission characteristics of high-birefringence fiber loop mirror [C]//SPIE, 2005, 5623: 777–782.
- [8] Sun G, Moon D S, Chung Y. Simultaneous temperature and strain measurement using two types of high-birefringence fibers in sagnac loop mirror [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2007, 19(24): 2027–2029.
- [9] Chinone N, Ulrich R. Elasto-optic polarization measurement in optical fiber [J]. *Optics Letters*, 1981, 6(1): 16–18.