

doi:10.3788/gzxb20164506.0606002

基于二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪的灵敏度增强 温度传感器

朱梦芳, 邵理阳, 张志勇, 闫连山

(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, 成都 610031)

摘 要:通过在基于高双折射光纤 Sagnac 干涉仪的 Sagnac 环内增加一段高双折射光纤并控制两段高双折射光纤的熔接角度,设计制作了二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪结构.利用 Jones 矩阵对反射谱特性进行了理论推导,对光束入射角度和高双折射光纤长度进行了优化,并对两种结构的干涉仪温度传感器进行仿真和实验.仿真结果表明,利用二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪结构的游标效应,能提高其作为温度传感器时的灵敏度;实验结果证明,单段 Sagnac 环干涉仪温度传感器灵敏度为 $-1.46 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,而使用二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪的温度传感灵敏度为 $-17.99 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,提高了约 12.32 倍.

关键词:光纤传感;温度传感器;Jones 矩阵;Loyt-Sagnac 干涉仪;高双折射光纤

中图分类号:TP212;TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)06-0606002-5

Fiber Optic Temperature Sensor Based on Second Order Loyt-Sagnac Interferometer

ZHU Meng-fang, SHAO Li-yang, ZHANG Zhi-yong, YAN Lian-shan
(Center for Information Photonics & Communications, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The second order Loyt-Sagnac interferometer was constructed by inserting two sections of highly birefringence fibers into the fiber loop and adjusting the fusion splicing angle. The transmission spectrum of the highly birefringence fiber Sagnac interferometer was calculated by using the Jones matrix analysis. The polarization angle of input light and the lengths of highly birefringence fibers were optimized. These two kinds of temperature sensors were simulated and experimented. The Simulation results show that the temperature sensitivity of the second order Loyt-Sagnac configuration can be enhanced because of its Vernier effect. The experimental results show that the temperature sensitivity is increased from $-1.46 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ to $-17.99 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ by using the proposed structure, increased 12.32 times.

Key words: Fiber sensor; Temperature Sensor; Jones matrix; Loyt-Sagnac interferometer; High birefringence fiber

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2420; 060.2300

0 引言

基于 Sagnac 干涉仪的光纤传感器可广泛应用于应力、压力、温度、电流和扭曲传感等^[1-2]物理量的测量.近年来,随着光纤技术的迅速发展,基于高双折射

光纤的 Sagnac 干涉仪传感器由于其传感结构更加灵活,灵敏度更高,成为传感器的一个重要研究方向^[3-4].

其原理是在 Sagnac 环中增加一段高双折射光纤,使光纤中互相垂直的偏振模式之间产生相位差,干涉仪输出梳状光谱.当干涉仪所处环境的某些物理量(如

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61475128)、科技部国际合作专项(No. 2014DFA11170)和中央高校基本科研基金(No. 2682014RC22)资助

第一作者:朱梦芳(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email:992559156@qq.com

导 师:张志勇(1974-),男,讲师,博士,主要研究方向为光纤传感与光信息处理. Email:zhiyongzhang@home.swjtu.edu.cn

通讯作者:邵理阳(1979-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感与光信息处理. Email:lyshao@home.swjtu.edu.cn

收稿日期:2016-01-25; **录用日期:**2016-02-26

<http://www.photon.ac.cn>

温度、压力等)发生变化时,系统输出光谱的峰值波长随之发生漂移.通过测量干涉光谱峰值波长漂移量,可实现对该物理量的测量.单段 Panda 型高双折射光纤(Highly Birefringence Fiber, HBF) Sagnac 干涉仪温度传感器的灵敏度为 $-1.9 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ^[5];为提高灵敏度,用填充有酒精的高双折射光子晶体光纤代替 Panda 型 HBF,其温度灵敏度可达到 $6.6 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ^[6],然而该方法操作复杂且花费大;利用光子带隙型光子晶体光纤模间干涉可提高传感灵敏度^[7],其传感灵敏度为 $71.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,温度测量范围为 $25\sim 700^\circ\text{C}$;利用纤芯模和包层模的干涉来测温度^[8],灵敏度为 $50.65 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,具有较低的应变灵敏度;将酒精填充进入光子晶体光纤,利用纤芯和包层模之间干涉可将传感灵敏度提高到 $78 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[9].但是这些方案由于受到光纤材料固有温度系数和传感结构的影响,其温度灵敏度都难有大的突破.

本文在 Sagnac 环里使用两段长度不同的高双折射光纤,组成二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪传感器,其中一段 HBF 作为参考光纤,另一段作为传感光纤,以产生游标效应^[10-11].利用游标效应,可使该结构的温度传感器较传统 Sagnac 干涉仪传感器具有更高的灵敏度.

1 二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪温度传感器传感原理与仿真

二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪温度传感器实验装置如图 1.它由一个低损耗耦合器(入射光经过耦合器后偏振方向不发生改变)、两个偏振控制器和两段不同长度的高双折射光纤经普通单模光纤连接组成.宽带光源发出的光经过光隔离器进入耦合器,耦合器将光波分成两束沿相反方向传输的波,通过环路到达耦合器,相干输出.系统的传输光谱由光谱分析仪接收并分析.

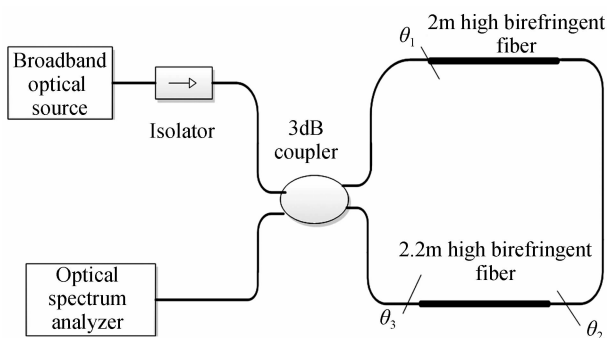


图 1 二阶 Loyt Sagnac 干涉仪传感器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the proposed Second order Loyt-Sagnac loop sensors

Jones 矩阵理论用于描述光偏振态以及光波经过光学器件后偏振态,是唯一可以处理瞬间电场的数学方法^[12].它可以多个光学元件构成的传输系统,看作多个光学元件的级联,整个传输系统的 Jones 矩

阵为各个光学元件的 Jones 矩阵依次线性相乘.其中偏振控制器(Polarization Controller, PC)、HBF 和耦合器的 Jones 矩阵^[13]分别为

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} e^{-j\varphi} & 0 \\ 0 & e^{j\varphi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_c = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} & j\sqrt{k} \\ j\sqrt{k} & \sqrt{1-k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $k=0.5$ 为 3 dB 耦合器的耦合系数,为光在 HBF 上传输时产生的相位变化.

二阶 Loyt-Sagnac 环顺时针传输矩阵 \mathbf{H}_{cw} 和逆时针传输矩阵 \mathbf{H}_{ccw} 分别表示为

$$\mathbf{H}_{\text{cw}} = \mathbf{R}(\theta_3) \mathbf{J}_2 \mathbf{R}(\theta_2) \mathbf{J}_1 \mathbf{R}(\theta_1) \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_{\text{ccw}} = \mathbf{R}(-\theta_1) \mathbf{J}_1 \mathbf{R}(-\theta_2) \mathbf{J}_2 \mathbf{R}(-\theta_3) \quad (5)$$

式中 \mathbf{J}_1 和 \mathbf{J}_2 为两段 HBF 的 Jones 矩阵.当一束光 E_i 从耦合器一端进入二阶 Loyt-Sagnac 系统时,理想情况下,探测器探测到的光矢量为

$$\mathbf{E}_o = (\mathbf{H}_{\text{cw}} - \mathbf{H}_{\text{ccw}}) \mathbf{E}_i / 2 \quad (6)$$

光强为表达式为

$$T = \mathbf{E}_o \times \mathbf{E}_o^* / \mathbf{E}_i \times \mathbf{E}_i \quad (7)$$

即可得该结构输出光谱表达式为^[14]

$$T = [\cos(\varphi_1 + \varphi_2) \cos \theta_2 \sin(\theta_1 + \theta_3) + \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \sin \theta_2 \cos(\theta_1 + \theta_3)]^2 \quad (8)$$

式中 φ_1 和 φ_2 为光通过两段不同长度的 HBF 引起的相位变化, θ_1 , θ_2 和 θ_3 为入射光和出射光与偏振轴之间的等效夹角.

普通单段 HBF Sagnac 干涉仪传感器的传输谱为一个周期性的光谱,其表达式为^[15]

$$T = \cos^2(\phi/2) \quad (9)$$

式中, $\phi = 2\pi BL/\lambda$ 为由 HBF 的双折射特性引入的相位差, B 是 HBF 的双折射, L 是 HBF 的长度, λ 为工作波长.当温度变化时, HBF 的双折射会发生变化,即 $\Delta B = K \times \Delta T$, K 为温度双折射系数,为温度的变化量.此时相位差可表示为

$$\phi = 2\pi(B - K \times \Delta T)L/\lambda \quad (10)$$

对单段 HBF Sagnac 干涉仪传感器的传输函数进行仿真,仿真中令 $K = 6.5 \times 10^{-7}$, $L = 2.2 \text{ m}$, $B = 6.9 \times 10^{-4}$,结果如图 2(a).其传输光谱为梳状谱,自由频谱宽度($f_{\text{sensor}} = 1.59 \text{ nm}$)定义为

$$f = \lambda^2 / BL \quad (11)$$

为了提高系统的灵敏度,在 Sagnac 环内串联两段长度不同的 HBF 来构成游标效应,如图 1.游标效应由两个不同周期的刻度尺组成^[10-11],能够有效提高测量准确度.两段长度不同的高双折射光纤相当于它的两个刻度尺.系统中长为 2 m 的 HBF 为参考光纤,相

当于游标卡尺里面的标尺;2.2 m 的 HBF 为传感光纤 ($f_{reference} = 1.74 \text{ nm}$),相当于游标卡尺里面的游尺.整个系统的输出函数如式(4),仿真中令 $\theta_1 + \theta_3 = \pi/4$, $\theta_2 = \pi/4$,输出波形如图 2(b).其包络的周期为^[16]

$$\frac{f_{\text{sensor}} \times f_{\text{reference}}}{|f_{\text{sensor}} - f_{\text{reference}}|} \quad (12)$$

式中, f_{sensor} 和 $f_{\text{reference}}$ 分别为传感光纤和参考光纤对应的自由频谱宽度.温度变化将引起二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪传感器的光谱峰值波长漂移,其波长漂移量相较于单段 HBF Sagnac 传感器增加了一个 $f_{\text{reference}} / |f_{\text{sensor}} - f_{\text{reference}}|$ 因子.

对比图 2(a)和(b)可知,当单段 Sagnac 干涉仪波长漂移 0.58 nm 时,对应二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪波长漂移增加到 6.95 nm,即灵敏度增加了 11.9 倍.

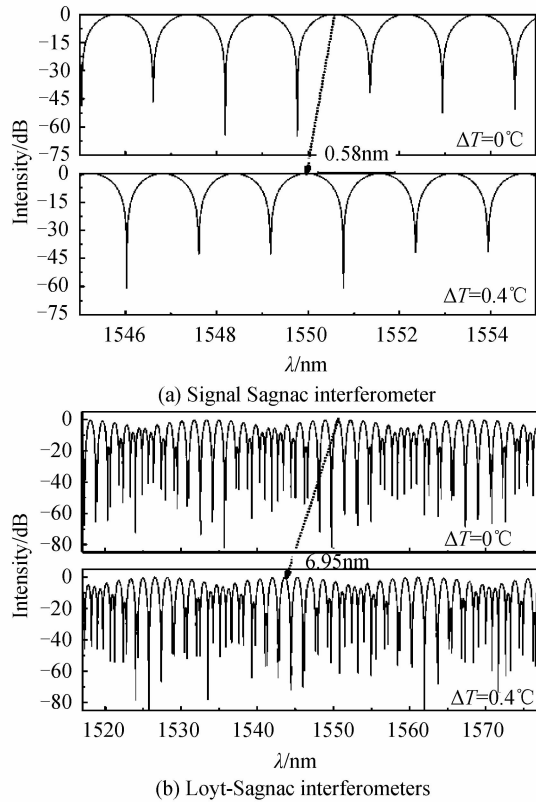


图 2 温度变化 0.4°C 时系统传输谱变化的仿真结果
Fig. 2 Simulation results of the transmission spectrum shifts when temperature change 0.4°C

2 实验

实验系统如图 1,其中宽带光源的波长范围选择 1 517~1 577 nm 波段;高双折射光纤选择 Panda 型保偏光纤,其双折射 $B \approx 6.9 \times 10^{-4}$;光谱分析仪型号为 AQ6370D,波长分辨率为 0.02 nm.单段 Sagnac 干涉仪温度传感系统与二阶 Loyt-Sagnac 系统的不同之处在于环内少了一段 2 m 的 HBF 和一个 PC,其余实验环境一样.

两种结构的温度传感器输出光谱如图 3,图中普

通单段 HBF Sagnac 干涉仪输出光谱的周期为 1.76 nm,二阶 Loyt-sagnac 干涉仪输出光谱的包络周期约为 17.66 nm.

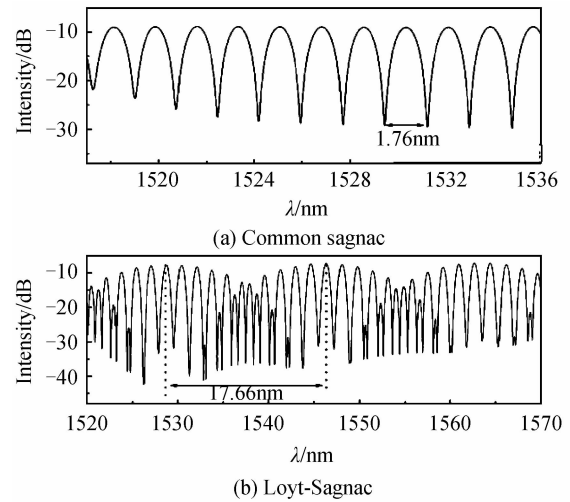


图 3 普通单段 Sagnac 和二阶 Solc-Sagnac 干涉仪温度传感系统输出光谱
Fig. 3 The transmission spectrum of common single Sagnac interferometer and Loyt-Sagnac interferometers

对于单段 Sagnac 干涉仪温度传感器,用一段长 2.2 m 的 HBF 作为传感光纤.将传感光纤置于一个温控箱中,温控箱中的温度从 35~45°C 连续变化,记录 HBF 所处不同环境温度下系统的输出光谱.实验过程中观察到光谱峰值波长向短波长方向移动.图 4 为 HBF 所处环境温度为 40°C 和 41°C 时 Sagnac 干涉仪传感器的输出光谱.由图可知随着温度的升高,光谱峰值波长向短波长方向漂移 1.46 nm.

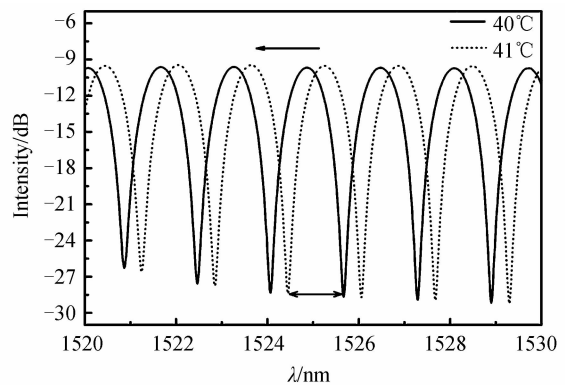


图 4 单段 Sagnac 干涉仪温度为 40°C 和 41°C 时输出光谱
Fig. 4 Spectral shift of the single Sagnac interferometer at the temperature of 40°C and 41°C

对于二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪温度传感器,2 m 的 HBF 作为参考光纤,2.2 m 的 HBF 作为传感光纤.实验中保持参考光纤所在环境温度不变,将传感光纤置于温控箱中.传感光纤所处温控箱的温度从 40~41.3°C 连续变化,记录不同温度下系统的输出光谱.实验过程中观察到光谱峰值波长向短波长方向移动.图 5 为传感光纤所处环境温度分别为 40°C 和 41°C 时系统

的输出光谱. 由图可知当温度升高 1°C 时, 光谱的峰值波长向短波长方向漂移了将近 17.71 nm .

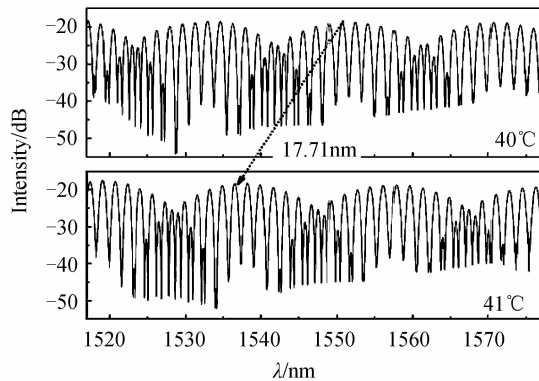


图5 温度分别为 40°C 和 41°C 时二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪的输出光谱变化

Fig. 5 Spectral shift of the Loyt-Sagnac interferometers at the temperature of 40°C and 41°C

与普通单段 HBF Sagnac 干涉仪温度传感器相比, 在相同的温度变化条件 (1°C) 下, Loyt-Sagnac 干涉仪温度传感器输出光谱的波长漂移量更大. 对两种结构的传感器进行实验, 分析不同温度下系统输出光谱峰值对应波长的变化, 可得波长与温度变化的关系, 结果如图 6.

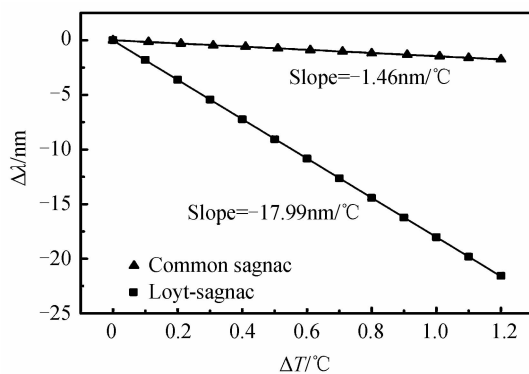


图6 普通单段 Sagnac 干涉仪和二阶 Loyt-sagnac 干涉仪传感器输出光谱波长随温度变化曲线

Fig. 6 The measured temperature responses of the single Sagnac interferometer and Loyt-Sagnac interferometers

图 6 为普通单段 HBF Sagnac 干涉仪温度传感器和二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪温度传感器的波长变化量与温度变化的关系曲线. 图中离散点为实验测量数据, 直线为线性拟合曲线. 由图可知随着温度的升高, 两种结构的温度传感器输出光谱的峰值波长都向短波长方向移动, 其中普通单段 HBF Sagnac 干涉仪的温度传感器灵敏度为 $-1.46\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$; 二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪温度传感器灵敏度为 $-17.99\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. 即二阶 Loyt-Sagnac 结构的传感器较传统的单段 HBF Sagnac 干涉仪传感器灵敏度提高了 12.32 倍, 实验结果与仿真结果吻合.

3 结论

本文提出了一种基于二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪的

温度传感器, 该结构将两段长度相差 0.2 m 的高双折射光纤串联在光纤环中构成二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪, 对该温度传感器进行了理论推导和实验验证. 结果表明二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪温度传感器稳定性高、线性度好. 其作为温度传感器灵敏度为 $-17.99\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 与传统的 Sagnac 干涉仪温度传感器相比, 灵敏度提高了约 12.32 倍.

参考文献

- [1] WANG Jia, HOU Hong-Lu, XU Jin-Tao. Sagnac fiber-optic current sensor without vibration sensitivity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 57-61.
王嘉, 侯宏录, 徐金涛. 一种新型 Sagnac 式光纤电流传感器 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 57-61.
- [2] ZHAO Yong. Research on fiber optic temperature sensor using a novel high-birefringent fiber loop mirror with a reflection probe [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2012, **184**(3): 22-27.
- [3] CAMPBELL M, ZHENG G, WALLACE P A, *et al.* A distributed frequency modulation continuous wave fiber stress sensor based on a birefringent Sagnac ring configuration [J]. *Optical Review*, 1997, **4**(4): 114-116
- [4] ANDRE R M, MARQUES M B, ROY P, *et al.* Fiber loop mirror using a small core microstructured fiber for strain and temperature discrimination [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(15): 1120-1122.
- [5] LIU Yan-ge, DONG Xin-yong. High birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(12): 2382-2390.
- [6] QIAN Wen-wen, ZHAO Chun-liu, HE Shao-ling, *et al.* High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(9): 1548-1550.
- [7] GENG You-fu, LI Xue-jin, DENG Yuan-long, *et al.* Sensitivity-enhanced high-temperature sensing using all-solid photonic bandgap fiber modal interference [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(4): 468-472.
- [8] WO Jiang-hai, SUN Qi-zhen, LIU Hai, *et al.* Sensitivity-enhanced fiber optic temperature sensor with strain response suppression [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(4): 289-292
- [9] FAVERO F C, SPITTEL R, JUST F, *et al.* A miniature temperature high germanium doped PCF interferometer sensor [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 30266-30274.
- [10] CLAES T, BOGAERTS W, BIENSTMAN P. Experimental characterization of a silicon photonic biosensor consisting of two cascaded ring resonators based on the Vernier-effect and introduction of a curve fitting method for an improved detection limit [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 22747-22761.
- [11] CAO Ye, CHEN Lei, TONG Zheng-rong. Tunable microwave photonic filter based on photonic crystal fiber Loyt-sagnac loop [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1106001.
曹晔, 陈磊, 童峥嵘. 基于光子晶体光纤 Loyt-Sagnac 环的可调谐微波光子滤波器 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1106001.
- [12] WU Jian-fen, CHEN Gen-xiang. Analysis on reflection characteristic of hibi fiber sagnac rings by Jones matrix [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 63-66.
武建芬, 陈根祥. 高双折射光纤 Sagnac 环反射特性的 Jones

- 矩阵分析[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(9):63-66.
- [13] SILVA R M, LAYEGHI A. Theoretical and experimental results of high-birefringent fiber loop mirror with an output port probe[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(8): 1032-1036.
- [14] CAO Ye, CHEN Lei, TONG Zheng-rong. A tunable microwave photonic filter based on phase modulation and photonic crystal fiber sagnac loop[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0923001.
曹晔, 陈磊, 童峥嵘. 基于相位调制和光子晶体光纤 Sagnac 环的可调谐微波光子滤波器[J]. 光子学报, 2015, **44**(9): 0923001.
- [15] ZU Peng, XIANG Wang-Hua, JIN Yong-Xin. Fabrication of temperature-insensitive twist sensor using low birefringent photonic crystal fiber based sagnac interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1433-1437.
祖鹏, 向望华, 金永兴. 基于低双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的超低温度系数扭曲传感器[J]. 光子学报, 2011, **40**(9): 1433-1437.
- [16] SHAO Li-yang, LUO Yuan, ZHANG Zhi-yong. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect [J]. *Optics Communications*, 2015, **336**: 73-76.