

文章编号 1004-924X(2017)09-2283-09

保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的 光学游标效应及温度传感器

赵春柳*, 丁振名, 吴彬青

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了实现高灵敏度的温度传感, 通过在基于保偏光纤 Sagnac 干涉仪的 Sagnac 环内增加一段保偏光纤, 控制两段保偏光纤快轴熔接角度接近 45° , 设计并制造了保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构。在理论上通过 Jones 矩阵推导了保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的干涉谱公式, 基于仿真分析研究了主要参数对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环输出特性的影响。仿真结果表明, 保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环实现了光学游标效应, 两段保偏光纤的平均长度、两段保偏光纤的长度差分别影响保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环输出干涉谱的波长间隔和包络周期; 在实验中, 将保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环应用在光纤温度传感器中。实验结果表明, 在 2 cm 的感温区域, 保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环温度传感器的灵敏度就达到了 $-2.44 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 是普通 Sagnac 干涉环温度传感器 ($-0.163 \text{ nm}/^\circ\text{C}$) 的 14.97 倍。

关键词: 光纤传感; 温度传感器; Sagnac 干涉仪; 光学游标效应; 保偏光纤

中图分类号: TN253; S951.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2283

Vernier effect based on optical fiber Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers and its application on temperature sensor

ZHAO Chun-liu*, DING Zhen-ming, WU Bin-qing

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: clzhao@cjlu.edu.cn

Abstract: An optical fiber Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers was designed and fabricated to realize high-sensitivity temperature sensing. In the optical fiber Sagnac loop, two sections of polarization maintaining fibers were spliced with an intersection angle of 45° between their fast axes. The interference spectrum formula of the Sagnac interference loop by the Jones matrix was deduced theoretically. The influence of main parameters of the formula on the output characteristics of the Sagnac interference loop was studied in simulation. The simulation results show that vernier effect can be achieved in the optical fiber Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers, of which the average length and the length difference affect wavelength intervals and envelope periods of output interference spectra of the Sagnac interference loop, respectively. In addition, the optical fiber Sagnac interference loop with two

收稿日期: 2017-04-17; 修订日期: 2017-05-16.

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No. LY17F050010)

angle shift spliced polarization maintaining fibers was applied as a fiber temperature sensor experimentally. The results show that the sensitivity of the proposed temperature sensor based on Sagnac interference loop is $-2.44 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ within 2 cm temperature zone, which is 14.97 times as compared with that ($-0.163 \text{ nm}/^\circ\text{C}$) of ordinary Sagnac loop sensors without vernier effect.

Key words: optical sensing; temperature sensor; sagnac interferometer; optical vernier effect; polarization maintaining fiber

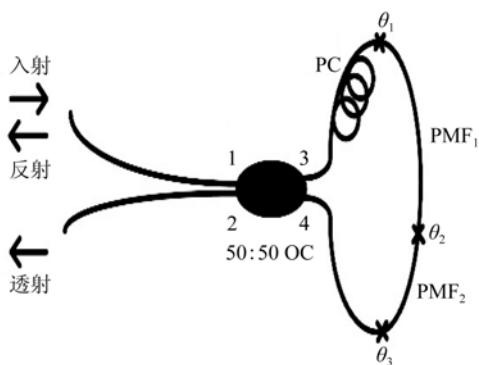
1 引言

Sagnac 干涉仪由于结构简单、灵敏度高,被广泛应用于温度传感^[1-2]、挥发性有机化合物传感^[3]、湿度传感^[4-5]、振动检测^[6]等领域。Sagnac 干涉仪用作传感器的一般原理是,在 Sagnac 环中加入一段保偏光纤,由于保偏光纤的双折射导致两个沿相反路径传输的光产生相位差,两束光在耦合器处相遇时会发生干涉,在 Sagnac 干涉仪输出端输出干涉谱。当外界参量如温度、压力等发生变化时,Sagnac 干涉仪输出的干涉谱会发生波长漂移,通过监测波长漂移量来实现对该物理量的测量。Juan Ruan^[7]等人提出了一种 Sagnac 干涉仪温度传感器,通过把单模光纤-多模光纤-保偏光纤-多模光纤-单模光纤拼接在一起插入 Sagnac 环中作为温度传感头,实现对温度的检测。最近,研究人员通过在传感器中应用游标放大效应,提高了传感器的灵敏度。游标放大效应常应用在游标卡尺中,用来提高长度测量的精度。通过级联干涉仪的两重滤波,可以产生周期性的游标干涉条纹,对应的干涉谱类似单个干涉仪的干涉谱,这就是光学频率梳游标效应^[8],简称“光学游标效应”。Shao L Y^[9]等人提出了一个级联的 Sagnac 干涉仪温度传感器,该传感器利用光学游标效应,灵敏度为 $-13.36 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,是单个 Sagnac 干涉仪温度传感器的 9.15 倍。但是这种温度传感器的结构复杂,要利用两个 Sagnac 干涉环才能实现光学游标效应,给实际应用带来了不便。

本文利用保偏光纤转轴熔接的方法实现了保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的光学游标放大效应,并基于此效应实现了高灵敏的温度传感。相比于级联的 Sagnac 干涉仪温度传感器,保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环温度传感器结构简单、灵敏度更高。

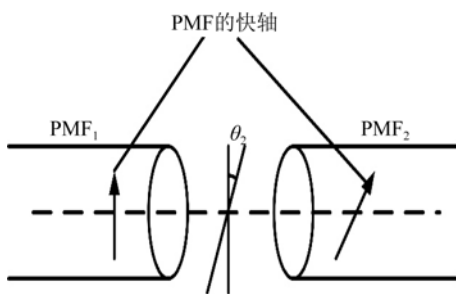
2 保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的结构及原理

图 1(a)所示为保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构图,它由一个 3 dB 光纤耦合器(50 : 50 OC),一个偏振控制器(Polarization Controller, PC)和两段保偏光纤(Polarization Maintaining Optical Fiber, PMF)组成。两段保偏光纤的长度分别为 L_1 和 L_2 。保偏光纤的熔接角度近似为 45° ,通过 Fujikura FSM-100P 保偏熔接机进行熔接, θ_2 表示两段保偏光纤快轴以接近 45° 角熔接,如图 1(b)所示。图 1(a)中的 θ_1, θ_3 分别表示传输光和 PMF₁、PMF₂ 偏振轴的夹角。输入光通过 3 dB 光纤耦合器传输,耦合器将光波分为两个沿 Sagnac 环顺、逆时针方向传输的光束。顺时针方向传输的光波经过偏振控制器后,进入第一根保偏光纤 PMF₁ 传输。由于保偏光纤存在快慢轴,在这两个偏振方向上的光波分量会产生一定的相位差,当顺时针传输的光束通过两段保偏光纤的转轴熔接点时,两个互相正交的偏振光均在第二段保偏光纤 PMF₂ 的快慢轴上投影,形成 4 个光分量。在沿 PMF₂ 传播的过程中,同样会产生相位差。对于逆时针传输的光束,同样可以用上面的方法分析。最后,顺、逆时针传输的两束光(4 个光分量)在 3 dB 耦合器处相遇发生干涉,在 Sagnac 干涉仪的输出端获得相对复杂的干涉谱。利用 Jones 矩阵对该干涉谱进行分析^[10-12]。如图 1(a)所示,端口 1 输入的人射光经过 3 dB 耦合器进行分束后沿 Sagnac 环顺逆时针传输,再次通过耦合器分别从端口 1 和端口 2 输出反射光和透射光。整个 Sagnac 环结构的 Jones 矩阵为各个等效光学元件的 Jones 矩阵按顺序线性相乘。



(a)保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构示意图

(a) Schematic of Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers



(b)保偏光纤转轴熔接角度示意图

(b) Splicing angle diagram of polarization maintaining fibers' angle

图 1 保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构及保偏光纤转轴熔接角度示意图

Fig. 1 Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers and PMF shaft welding angle

3 dB 耦合器的 Jones 矩阵为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-K} & i\sqrt{K} \\ i\sqrt{K} & \sqrt{1-K} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: i 表示耦合臂和直通臂之间的光场相位有 $\pi/2$ 的相位差异;分光比 K 是衡量耦合器的性能的重要参数之一^[13],本文中 3 dB 耦合器的分光比 $K=0.5$ 。

PC 及图 1 中所示 θ_1, θ_2 和 θ_3 对入射光发生作用的 Jones 矩阵为:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 θ 表示入射光及出射光的光场在此处传播的坐标系经过了一次旋转变换。

保偏光纤 PMF_1 和 PMF_2 的 Jones 矩阵分别为^[14]:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi_2} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: $\varphi_1 = \pi \Delta n_1 L_1 / \lambda, \varphi_2 = \pi \Delta n_2 L_2 / \lambda, \Delta n_1, \Delta n_2$ 分别为 $\text{PMF}_1, \text{PMF}_2$ 的有效折射率差, L_1, L_2 分别为 $\text{PMF}_1, \text{PMF}_2$ 的长度。本文涉及到的保偏光纤所处状态均为其工作的最佳环境,即不受到光纤弯曲、扭转和挤压的影响,所以保偏光纤可视为普通的相位延迟器^[15],即保偏光纤的慢轴和快轴两主轴上传输的光场会有不同的相位延迟。由此用 Jones 矩阵线形乘积来表示整个保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的光传输变换,得到顺、逆时针光路的传输矩阵 $\mathbf{M}_{\text{CL}}, \mathbf{M}_{\text{CO}}$ 分别为:

$$\mathbf{M}_{\text{CL}} = \mathbf{R}(\theta_3) \mathbf{T}_2 \mathbf{R}(\theta_2) \mathbf{T}_1 \mathbf{R}(-\theta_1), \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{\text{CO}} = \mathbf{R}(\theta_1) \mathbf{T}_2 \mathbf{R}(\theta_2) \mathbf{T}_1 \mathbf{R}(-\theta_3). \quad (6)$$

则保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的透射率公式为:

$$\mathbf{T} = (\mathbf{M}_{\text{CL}} + \mathbf{M}_{\text{CO}})^* (\mathbf{M}_{\text{CL}} + \mathbf{M}_{\text{CO}}), \quad (7)$$

其中 $(\mathbf{M}_{\text{CL}} + \mathbf{M}_{\text{CO}})^*$ 和 $(\mathbf{M}_{\text{CL}} + \mathbf{M}_{\text{CO}})$ 互为共轭转置矩阵。

由式(5)~式(7)得保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的透射函数如下:

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

其中: $\theta_1 - \theta_3$ 表示相邻两段保偏光纤入射光和出射光与保偏光纤偏振轴之间的夹角的差值,实验中可以通过调节 PC 来改变 $\theta_1 - \theta_3$ 的值。

由式(8)可知,保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的透射谱是由两个不同周期的透射谱叠加产生的,由此可以产生游标效应。设游标效应产生的包络周期为 $\Delta\lambda_2$,可表示为^[9]:

$$\Delta\lambda_2 = \frac{\text{FSR}_1 \times \text{FSR}_2}{|\text{FSR}_1 - \text{FSR}_2|} = \frac{\lambda^2}{\Delta n |L_2 - L_1|}, \quad (9)$$

其中 FSR_1 和 FSR_2 分别表示两个不同周期透射谱的自由频谱范围 (Free Spectrum Range, FSR),即有:

$$\text{FSR}_1 = \lambda^2 / \Delta n L_1, \text{FSR}_2 = \lambda^2 / \Delta n L_2. \quad (10)$$

这里详细研究了主要参数对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环输出特性的影响。

2.1 $\theta_1 - \theta_3$ 的值对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环干涉谱的影响

两段保偏光纤的长度分别为 $L_1 = 1.9 \text{ m}$,

$L_2 = 1.77$ m, 两段保偏光纤的有效折射率差为 $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 4.2 \times 10^{-4}$, 两段保偏光纤转轴熔接角度 $\theta_2 = \pi/4$, $\theta_1 - \theta_3$ 分别取 $\pi/5, \pi/6, \pi/8$ 。数值模拟结果如图 2 所示。

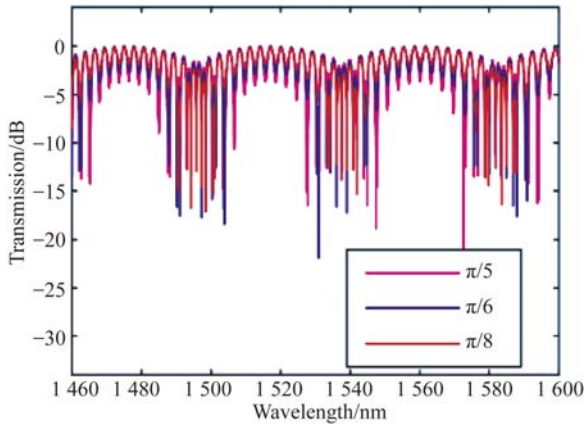
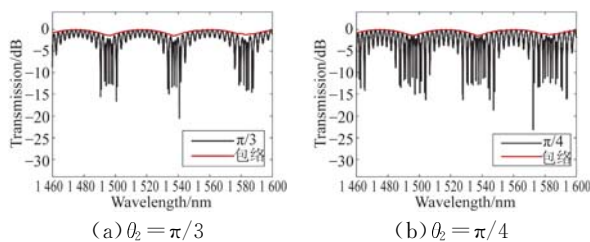


图 2 $\theta_1 - \theta_3$ 取不同值时保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环输出的干涉谱
Fig. 2 Interference spectra of Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers for $\theta_1 - \theta_3$ of different values

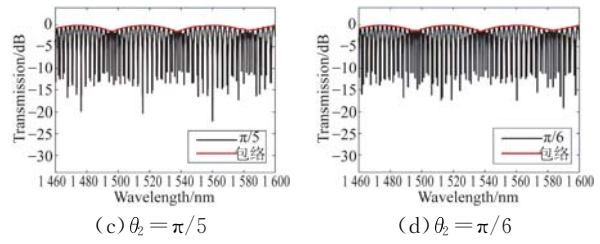
图 2 即为保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环在 $\theta_1 - \theta_3$ 取不同值时的干涉谱。在输出光谱中, 3 条曲线从下到上对应的 $\theta_1 - \theta_3$ 分别为 $\pi/5, \pi/6, \pi/8$ 。设 $\Delta\lambda_1$ 为干涉谱波长间隔的平均值, $\Delta\lambda_2$ 为干涉谱的包络周期。可见 $\theta_1 - \theta_3$ 取值不同, 波长间隔的平均值 $\Delta\lambda_1$ 保持不变为 3 nm, 干涉谱包络周期 $\Delta\lambda_2$ 也保持不变为 45 nm, 但是保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的调制深度逐渐改变, 并且在 $\theta_1 - \theta_3 = \pi/5$ 时达到最大。

2.2 θ_2 对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环干涉谱的影响

两段保偏光纤的长度分别为 $L_1 = 1.9$ m, $L_2 = 1.77$ m, 两段保偏光纤的有效折射率差为 $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 4.2 \times 10^{-4}$, 两段保偏光纤转轴熔接角度 θ_2 分别为 $\pi/3, \pi/4, \pi/5, \pi/6$, $\theta_1 - \theta_3$ 取 $\pi/5$ 时, 数值模拟结果如图 3 所示。



(a) $\theta_2 = \pi/3$ (b) $\theta_2 = \pi/4$



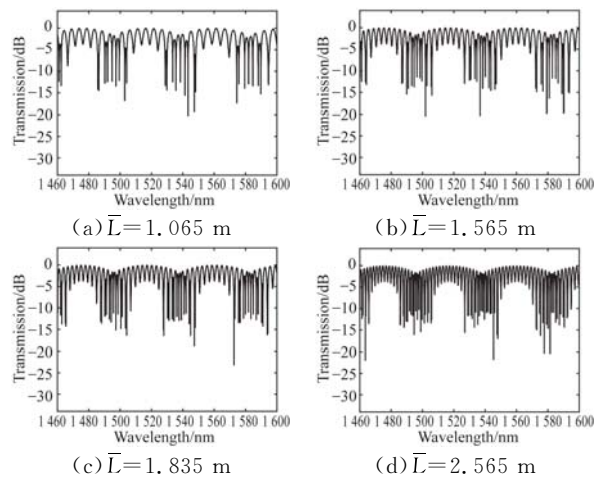
(c) $\theta_2 = \pi/5$ (d) $\theta_2 = \pi/6$

图 3 θ_2 取不同值时保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环输出的干涉谱及干涉谱包络
Fig. 3 Interference spectra of Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers for different θ_2 values

由图 3 可知, θ_2 取不同值时干涉谱波长间隔的平均值 $\Delta\lambda_1$ 保持不变仍为 3 nm, 包络周期 $\Delta\lambda_2$ 也保持不变仍为 45 nm, 但是保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环输出干涉谱的调制深度随着 θ_2 的减小逐渐增大。

2.3 两段保偏光纤的平均长度对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环干涉谱的影响

设两段保偏光纤的长度差 $\Delta L = L_1 - L_2$, 平均长度 $\bar{L} = (L_1 + L_2)/2$ 。取 $\theta_1 - \theta_3 = \pi/5$, 两段保偏光纤转轴的熔接角度 $\theta_2 = \pi/4$, 保偏光纤的有效折射率差 $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 4.2 \times 10^{-4}$ 。保持两段保偏光纤的长度差 $\Delta L = 0.13$ nm 不变, 改变两段保偏光纤的平均长度 \bar{L} 的值。取 L_1, L_2 分别为 $(L_1 = 1.13$ m, $L_2 = 1$ m), $(L_1 = 1.63$ m, $L_2 = 1.5$ m), $(L_1 = 1.9$ m, $L_2 = 1.77$ m), $(L_1 = 2.63$ m, $L_2 = 2.5$ m), 数值模拟结果如图 4 所示。



(a) $\bar{L} = 1.065$ m (b) $\bar{L} = 1.565$ m
(c) $\bar{L} = 1.835$ m (d) $\bar{L} = 2.565$ m

图 4 两段保偏光纤的平均长度 (\bar{L}) 取不同值时保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环输出的干涉谱
Fig. 4 Interference spectra of Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers for different average lengths of two PMFs (\bar{L})

由图 4 可知, $\Delta\lambda_1$ 的值与 \bar{L} 的取值有关, 而 $\Delta\lambda_2$ 与 \bar{L} 的取值无关。 \bar{L} 与 $\Delta\lambda_1$ 的具体关系曲线如图 5 所示。

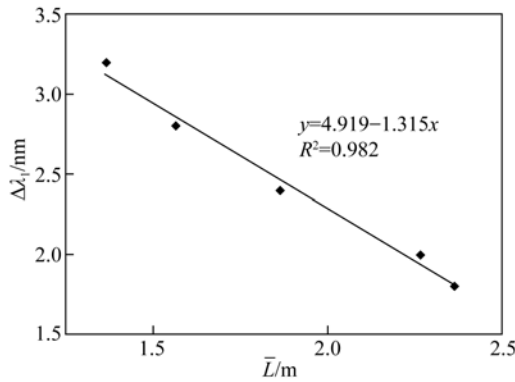


图 5 \bar{L} 与 $\Delta\lambda_1$ 的关系曲线
Fig. 5 Relation curve of \bar{L} and $\Delta\lambda_1$

由图 5 可知, 随着 \bar{L} 的增加, $\Delta\lambda_1$ 越来越小。保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的干涉谱的梳状滤波间隔与保偏光纤长度有关, 保偏光纤长度越长, 干涉谱的梳状滤波就越密。

2.4 两段保偏光纤的长度差值对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环干涉谱的影响

取 $\theta_1 - \theta_3 = \pi/5$, 两段保偏光纤转轴的熔接角度 $\theta_2 = \pi/4$, 两段保偏光纤的有效折射率差 $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 4.2 \times 10^{-4}$, 两段保偏光纤的平均长度 $\bar{L} = 1.835$ m, 改变两段保偏光纤的长度差 ΔL 。 ΔL 分别取 0.1 m ($L_1 = 1.885$ m, $L_2 = 1.785$ m)、0.13 m ($L_1 = 1.9$ m, $L_2 = 1.77$ m)、0.16 m ($L_1 = 1.915$ m, $L_2 = 1.755$ m)、0.19 m ($L_1 = 1.93$ m, $L_2 = 1.74$ m), 数值模拟结果如图 6 所示。

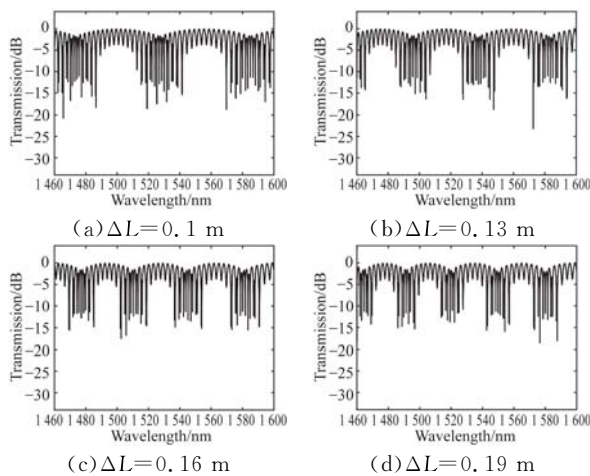


图 6 两段保偏光纤的长度差值 (ΔL) 不同时保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的干涉谱
Fig. 6 Interference spectra of Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers for different length differences of two PMFs (ΔL)

由图 6 可知, $\Delta\lambda_1$ 与 ΔL 无关, 而 $\Delta\lambda_2$ 随着 ΔL 的增大逐渐减小, 具体关系如图 7 所示。

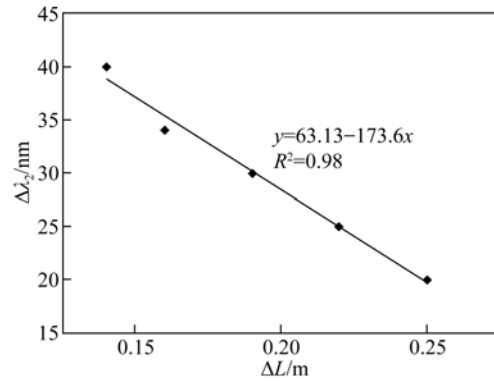


图 7 ΔL 与 $\Delta\lambda_2$ 的具体关系曲线
Fig. 7 Relation curve of ΔL and $\Delta\lambda_2$

2.5 温度对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环干涉谱的影响

当温度发生变化时, 保偏光纤传感区 (受热区) 的有效折射率差、长度会随之变化。对于只有一段保偏光纤的 Sagnac 结构, 温度变化时, 传输光经过保偏光纤的相位差 φ 是受热区 l 和未受热区 ($L-l$) 产生的相位差的和, 表示为^[16]:

$$\varphi = \pi[\Delta n(L-l) + \Delta n'l']/\lambda, \quad (11)$$

其中: $\Delta n' = \Delta n - K \times \Delta T$, $l' = l(1 + \alpha \Delta T)$ 。整理得:

$$\varphi = \pi(\Delta nL - l \times K \Delta T + \Delta nl \times \alpha \Delta T)/\lambda, \quad (12)$$

其中: L 为保偏光纤的长度, l 为传感区 (受热区) 长度, K 为温度双折射系数, ΔT 为温度的变化量, α 为保偏光纤的热膨胀系数。

同理, 对于保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构, 将长度为 L_1 的 PMF_1 的一部分 l_1 作为传感光纤, 当温度发生变化时, 传输光通过 PMF_2 产生的相位差保持不变, 通过 PMF_1 产生的相位差 φ' 是受热区 l_1 和未受热区 ($L_1 - l_1$) 的相位差的和, 表示为:

$$\varphi' = \pi[\Delta n_1(L_1 - l_1) + \Delta n'l_1(1 + \alpha \Delta T)]/\lambda, \quad (13)$$

其中 $\Delta n'_1 = \Delta n_1 - K \times \Delta T$ 。整理得:

$$\varphi' = \pi(\Delta n_1 L_1 - l_1 K \Delta T + \Delta n_1 l_1 \alpha \Delta T)/\lambda, \quad (14)$$

由式(8)得, 当 Sagnac 干涉环只由一段保偏光纤构成时, $\theta_2 = 0$ 。温度变化时, Sagnac 干涉环的透射函数为:

$$T = \sin^2(\theta_1 - \theta_3) \cos^2 \varphi. \quad (15)$$

由式(8)得温度发生变化时, 保偏光纤转轴熔

接 Sagnac 干涉环的透射函数 T 为:

$$T = [\sin(\theta_1 - \theta_3) \cos \theta_2 \cos(\varphi' + \varphi_2) + \cos(\theta_1 - \theta_3) \sin \theta_2 \cos(\varphi' - \varphi_2)]^2. \quad (16)$$

温度变化时对保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环进行仿真分析,取 $\theta_1 - \theta_3 = \pi/5$, 两段保偏光纤转轴熔接角度 $\theta_2 = \pi/4$, 有效折射率差 $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 4.2 \times 10^{-4}$, PMF₁、PMF₂ 的长度 L_1 、 L_2 分别取 1.9 m, 1.77 m. 传感区长度 $l_1 = 2$ cm, 取温度双折射系数 $K = 6.9 \times 10^{-7}$, 热膨胀系数 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}$ [17], 温度变化 $\Delta T = 30$ °C. 仿真结果如图 8 所示。

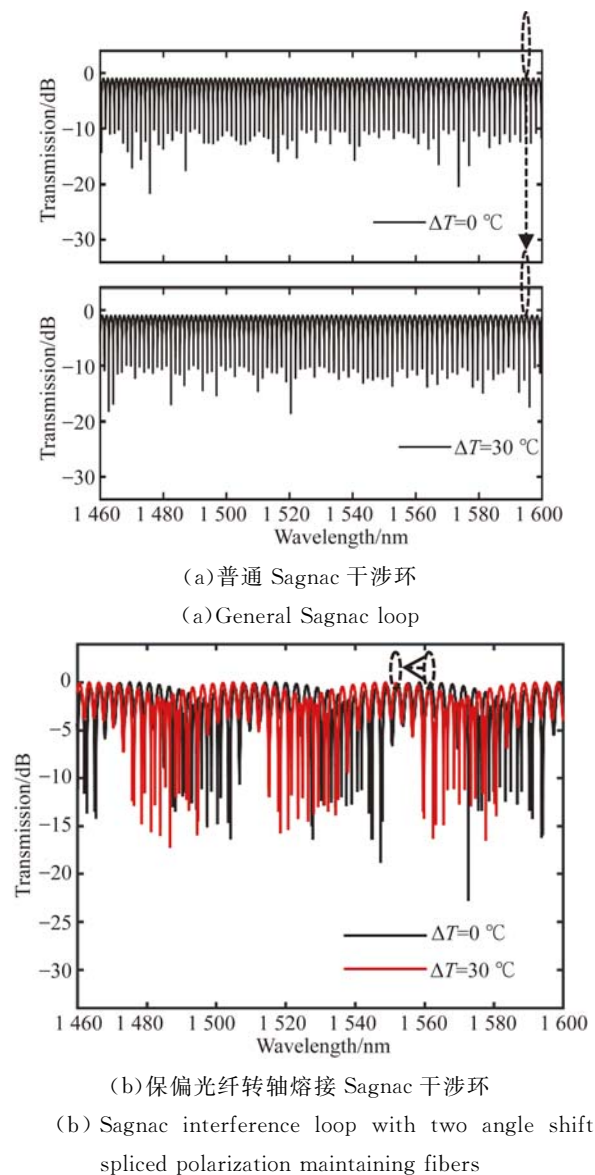


图 8 温度变化 30 °C 时 Sagnac 干涉环输出干涉谱

Fig. 8 Interference spectra of Sagnac interference loops with temperature variation of 30 °C

由图 8 可知,当温度变化 30 °C 时,保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环的干涉谱向短波方向移动,包络的峰值移动量远远大于没有光学游标效应的 Sagnac 干涉峰的移动量。干涉谱向短波方向移动是因为 \cos 函数的相位值随温度减小,导致波形整体向短波方向移动。

综上,相邻两段保偏光纤入射光和出射光与保偏光纤偏振轴之间的夹角差值 $\theta_1 - \theta_3$ 影响保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环干涉谱的调制深度,并且随着 $\theta_1 - \theta_3$ 的增大调制深度逐渐增大;两段保偏光纤转轴熔接的角度 θ_2 影响干涉谱的调制深度,且随着 θ_2 的减小,调制深度逐渐增大;两段保偏光纤的平均长度 \bar{L} 影响干涉谱的波长间隔,并且随着平均长度 \bar{L} 的增加,波长间隔的平均值 $\Delta \lambda_1$ 逐渐减小;两段保偏光纤的长度差值 ΔL 影响干涉谱的包络周期 $\Delta \lambda_2$,并且随着长度差值 ΔL 的增大,包络周期 $\Delta \lambda_2$ 逐渐减小。

3 温度传感特性实验研究

图 9 表示了保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环在温度传感系统中的应用。其中,SLED 宽带光源的波段为 1 420~1 620 nm,输出总光功率 10.2 mW, YOKOGAWA AQ6370 光谱分析仪 (OSA) 的波长分辨率为 0.02 nm. 保偏光纤型号为 Nufern PM1550-XP, 其中 PMF₁ 和 PMF₂ 的长度 L_1 、 L_2 分别取 1.9, 1.77 m. 图 9 中 PMF₁ 红色段为传感区,考虑到实际应用中,受热区域多为局部受热,故传感区的长度取 2 cm. 普通 Sagnac 温度传感器的 Sagnac 环中只有一段保偏光纤,长度为 3.67 m,其温度传感区也为 2 cm. 将保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器和普通 Sagnac 温度传感器的 2 cm 温度传感区放在加热板上加热。从 30 °C 开始升温到 60 °C,每升温 5 °C 测量一次,每个温度状态保持 2 min。

图 10(a) 表示普通 Sagnac 光纤温度传感器在 30 °C 时没有光学游标效应的干涉谱。图 10(b) 表示保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器在 30 °C 时有游标效应的干涉谱。显然,基于光学游标效应的 Sagnac 温度传感器的干涉谱有包络,包络的形状与数值模拟得到的结果(图 4(c))一致,包络的周期大约为 45 nm. 由于两种温度传感器中保偏光纤的平均长度相同,由图 6 可知,Sagnac 干

涉环输出干涉谱的波长间隔的平均值相同,这与实验得到的结果一致。

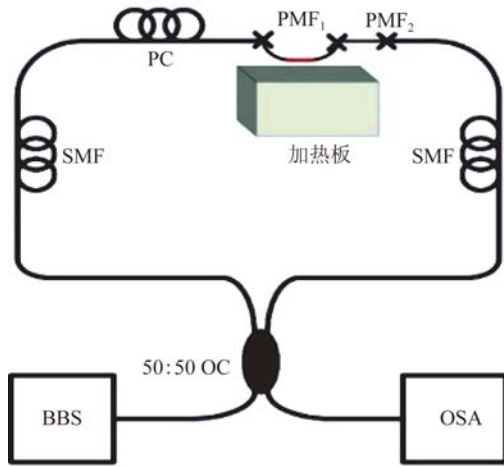
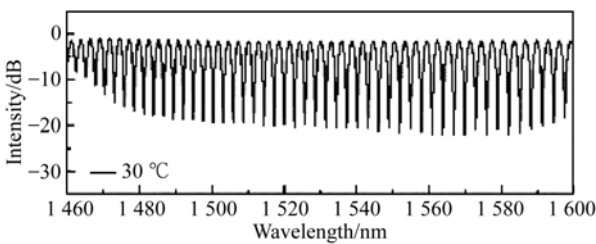


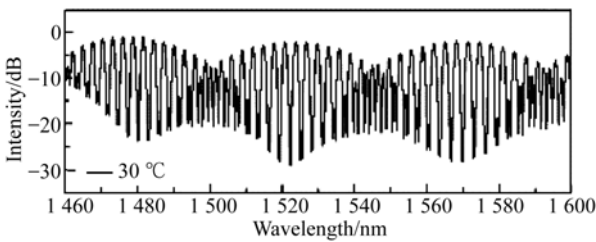
图 9 保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环用于温度传感系统

Fig. 9 Temperature sensing system based on optical fiber Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers



(a) 普通 Sagnac 温度传感器的干涉谱

(a) Interference spectra of general Sagnac temperature sensor



(b) 保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器的干涉谱

(b) Interference spectra of Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers

图 10 Sagnac 温度传感器的干涉谱

Fig. 10 Interference spectra of Sagnac temperature sensors

随着温度的增加,普通 Sagnac 温度传感器的干涉谱如图 11 所示,波长朝着短波方向漂移。当

温度从 30 °C 增加到 60 °C 时,波长总的漂移量为 4.9 nm。图 12 展示了温度分别为 30 °C 和 35 °C 时,保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器的干涉谱的漂移,由图可以看出波长向短波方向漂移,漂移量为 11.87 nm。作为观测对象的干涉峰位置刚好是包络线的峰值位置,观测该干涉峰的漂移,也就是观测干涉包络曲线峰值的漂移。根据观测结果,波长漂移量被大幅放大,实现了游标效应,从而提高了传感器的灵敏度。图 13 展示了温度从 30 °C 升到 60 °C 时,保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器干涉谱的包络漂移。由图 13 可知,波长朝着短波方向漂移,干涉谱包络的总漂移量为 72.1 nm,这是普通 Sagnac 温度传感器的 14.7 倍。保偏光纤受热区越长,干涉谱包络的总漂移量越大,传感器的灵敏度越高。

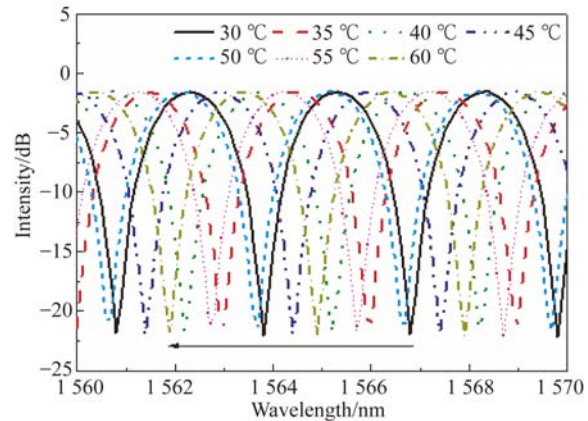


图 11 不同温度下普通 Sagnac 温度传感器的干涉谱

Fig. 11 Interference spectra of general Sagnac temperature sensor at different temperatures

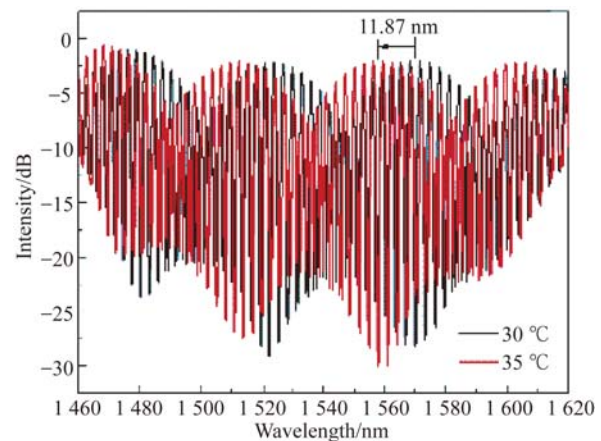


图 12 30 °C 和 35 °C 时保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器的干涉谱

Fig. 12 Interference spectra of Sagnac interference loop with two angle shift spliced polarization maintaining fibers at 30 °C and 60 °C respectively

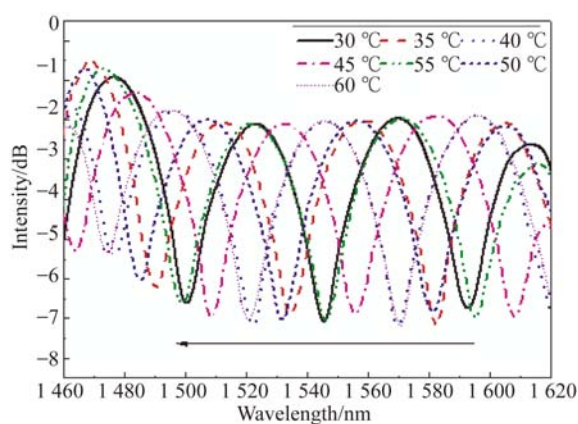


图 13 不同温度下保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器干涉谱包络的漂移

Fig. 13 Envelope shift of Sagnac temperature sensor with two angle shift spliced polarization maintaining fibers at different temperatures

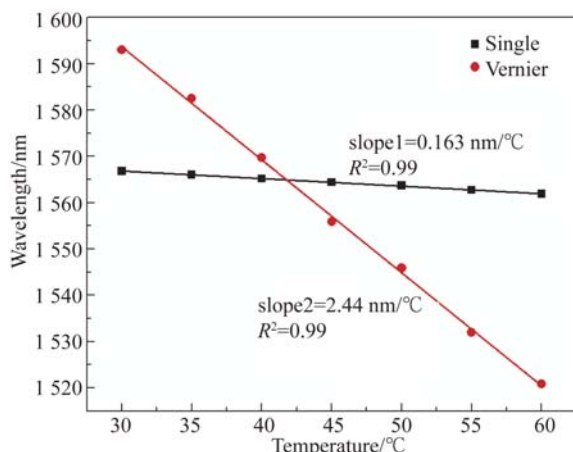


图 14 两种 Sagnac 温度传感器温度和波长之间的关系
Fig. 14 Relationship between temperature and wavelength for two Sagnac temperature sensors

参考文献:

- [1] QIAN W W, ZHAO C L, HE S L, *et al.*. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9):1548-1550.
- [2] SHI J, WANG Y Y, XU D G, *et al.*. Temperature sensor based on fiber ring laser with Sagnac loop [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(7):794-797.
- [3] NING X P, CHEN L H, ZHAO C L, *et al.*. PDMS film coated fiber volatile organic compounds sensor [C]. *Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications*, Optical Society of America, 2015.

图 14 为两种 Sagnac 温度传感器的波长和温度的关系。显然,和普通 Sagnac 温度传感器 ($-0.163 \text{ nm}/^\circ\text{C}$) 相比,有光学游标效应的保偏光纤转轴熔接 Sagnac 温度传感器具有更高的温度灵敏度 ($-2.44 \text{ nm}/^\circ\text{C}$),而且灵敏度被放大了 14.97 倍,这是由光谱中包络的位置决定的。Sagnac 温度传感器的温度灵敏度与保偏光纤受热的长度有关,当保偏光纤受热的长度增加时, Sagnac 温度传感器的温度灵敏度也会增加。

4 结 论

本文提出了一个保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构,通过以接近 45° 角熔接两段长度相近的保偏光纤,实现了光学游标效应。理论上分析了保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构的数学游标效应,并仿真分析了保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构的干涉谱与相邻两段保偏光纤入射光和出射光与保偏光纤的偏振轴之间的夹角的差值、保偏光纤转轴熔接角度、保偏光纤的平均长度、保偏光纤的长度差值的关系。最后,通过实验将保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构用于温度传感系统。实验结果表明,该传感系统输出的干涉谱的周期约为 45 nm ,温度灵敏度为 $-2.44 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,是普通 Sagnac 温度传感器灵敏度的 14.97 倍。本文提出的保偏光纤转轴熔接 Sagnac 干涉环结构简单、容易制作、灵敏度高,可以实现光学游标效应,在温度、压力传感等领域具有广阔的应用前景。

- [4] SUN L P, LI J, JIN L, *et al.*. High-birefringence microfiber Sagnac interferometer based humidity sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 231:696-700.
- [5] SUN L P, LI J, JIN L, *et al.*. High-sensitivity humidity sensor based on microfiber Sagnac interferometer [C]. *Asia Communications and Photonics Conference 2015*, Optical Society of America, 2015.
- [6] 崔洪亮, 刘野, 于森, 等. 小波降噪在分布式光纤干涉振动检测及定位系统中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10):71-76.
- CUI H L, LIU Y, YU M, *et al.*. Application of wavelet denoising in distributed optical fiber interferometric vibration detection and location system

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):71-76. (in Chinese)
- [7] RUAN J, HUANG P, QIN Z X, *et al.*. Temperature characteristic of SMPMS fiber structure-based Sagnac loop [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(1):62-64.
- [8] URQUHART P. Compound optical-fiber-based resonators [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, 5(6):803-812.
- [9] SHAO L Y, LUO Y, ZHANG Z Y, *et al.*. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect [J]. *Optics Communications*, 2015, 336:73-76.
- [10] WANG J, ZHENG K, PENG J, *et al.*. Theory and experiment of a fiber loop mirror filter of two-stage polarization-maintaining fibers and polarization controllers for multiwavelength fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(13):10573-10583.
- [11] 陆卫国, 吴易明, 高立民, 等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):539-545.
LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):539-545. (in Chinese)
- [12] MORTIMORE D B. Fiber loop reflectors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(7):1217-1224.
- [13] SRIVASTAVA S, GUPTA N, SAINI M, *et al.*. Power exchange in coupled optical waveguides [J]. *Journal of Optical Communications*, 1997, 18(1):5-9.
- [14] 王夏霄, 秦祎, 王野, 等. 光纤电流传感器的延迟光纤偏振串音误差[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11):2930-2936.
WANG X X, QIN W, WANG Y, *et al.*. Errors of fiber delay line polarization crosstalk for all fiber optical current sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11):2930-2936. (in Chinese)
- [15] 郭宏雷. 基于高双折射光纤环境的波长交错器(Interleaver)及光纤色散研究[D]. 天津:南开大学, 2006.
GUO H L. *Study the Wavelength Interleaver and Dispersion based on High Birefringent Fiber Optical Environment* [D]. Tianjin: Nankai University, 2006. (in Chinese)
- [16] 朱梦芳. 基于二阶 Loyt-Sagnac 干涉仪结构的多参量传感方法与实验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
ZHU M F. *Multi-parameter Sensing based on Two Order Loyt-Sagnac Interferometry* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [17] 王力维, 马秀荣, 曹晔, 等. 高双折射光纤双折射温度特性新型测量方法研究[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(10):1372-1374.
WANG L W, MA X R, CAO Y, *et al.*. A novel method of measuring the birefringence temperature characteristic of high birefringence fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(10):1372-1374. (in Chinese)

作者简介:



赵春柳(1973—),女,内蒙古呼伦贝尔人,博士,教授,1996年于内蒙古大学获得学士学位,1999年、2002年于南开大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光纤传感、光纤通信、光子晶体光纤、光纤激光器放大器和光纤光栅等光纤相关领域的工作。E-mail: clzhao@cjlu.edu.cn



丁振名(1993—),男,辽宁朝阳人,硕士研究生,2015年于长沙理工大学获得学士学位,主要从事光纤激光器、光纤传感方面的研究。E-mail: 1787113755@qq.com