

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307048

一阶光学游标效应的全光纤温度传感器^{*}

杨玉强^{1,2,3} 张钰颖^{1,3} 高佳乐^{1,3} 边缘⁴ 牟小光⁵ 王 骥³ 杨文虎^{1,3} 王文华³

(1. 广东海洋大学深圳研究院 深圳 518120; 2. 广东海洋大学广东省南海海洋牧场智能装备重点实验室 湛江 524088;

3. 广东海洋大学智慧海洋传感网及其装备工程技术研究中心 湛江 524088;

4. 哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院 哈尔滨 150080; 5. 广东海洋大学机械工程学院 湛江 524088)

摘 要: 本文提出并制备了一种基于法布里-珀罗干涉计(FPI)和迈克尔逊干涉计(MI)并联的全光纤温度传感器,该传感器由单模光纤依次错位熔接一段悬浮芯光纤和一段单模光纤而成,熔接和切割形成的反射面构成了FPI干涉计和MI干涉计,且MI干涉计的光程约为FPI干涉计光程的2倍(略大于2倍),从而,两干涉计产生了一阶谐波游标效应。实验结果表明,该传感器干涉谱中出现了具有明显一阶谐波游标效应特征的双包络,且随着温度的升高,干涉谱双包络逐渐红移,红移量远大于单个MI干涉计;在20℃~120℃的温度范围内,该传感器的温度灵敏度为208 pm/℃,约为单个MI干涉计的20.8倍,约为单个FPI干涉计的245倍;升降温实验以及同一温度多次测量实验均表明,该传感器具有良好的重复性和稳定性。该传感器在同一根光纤内实现了FPI和MI并联,其传感头总长度仅约为584.4 μm,且为全光纤尖端结构,因此,特别适合于小空间环境高温检测。

关键词: 光纤传感器;法布里-珀罗干涉计;迈克尔逊干涉计;光学游标效应

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 060.2370;060.2310;060.4005;060.2300

All-fiber temperature sensor based on first-order optical Vernier effect

Yang Yuqiang^{1,2,3} Zhang Yuying^{1,3} Gao Jiale^{1,3} Bian Yuan⁴ Mu Xiaoguang⁵Wang Ji³ Yang Wenhua^{1,3} Wang Wenhua³

(1. Shenzhen Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China; 2. Guangdong Provincial Key

Laboratory of Intelligent Equipment for South China Sea Marine Ranch, Guangdong Ocean University,

Zhanjiang 524088, China; 3. Research Center of Guangdong Smart Oceans Sensor Networks and Equipment

Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 4. School of Measurement and Communication

Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

5. College of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: In this paper, a novel all-fiber temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer (FPI) and Michelson interferometer (MI) is proposed and fabricated. The sensor is formed by sequentially fusion-splicing a single-mode fiber, a segment of suspended-core fiber (SCF), and another segment of single-mode fiber, with each connection having an offset. The reflecting surfaces formed by the fusion and cutting constitute the FPI and MI, and the optical path of MI is about 2 times (slightly more than 2 times) that of FPI, so the two interferometers produce the first-order harmonic vernier effect. The experimental results show that the double envelopes with obvious first-order harmonic Vernier effect appears in the interference spectrum of the sensor, and with the increase of temperature, the double envelopes of the interference spectrum gradually red-shifts, and the red-shift amount is much greater than that of a single MI. In the temperature range of 20℃~120℃, the temperature sensitivity of the sensor is 208 pm/℃, about 20.8 times that of a single MI, and about 245 times that of a single FPI. The temperature rising and falling experiments and multiple measurement experiments at the same

收稿日期:2023-11-15 Received Date: 2023-11-15

^{*} 基金项目:广东省自然科学基金面上项目(2023A1515011212, 2022A1515011603)、深圳市基础研究面上项目(JCYJ20210324122813036、JCYJ20220530162200001)、广东省普通高校重点领域专项(2021ZDZX1015)、广东海洋大学研究生教育创新计划项目(202328)资助

temperature show that the sensor has good repeatability and stability. The sensor realizes the parallel connection of FPI and MI within the same optical fiber, with a total length of the sensor head being only about 584.4 μm . Additionally, it features an all-fiber tip structure, making it particularly suitable for high-temperature detection in small space environments.

Keywords: optical fiber sensor; Fabry-Perot interferometer; Michelson interferometer; optical vernier effect

0 引言

光纤以其体积小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰以及可长距离传输信号等优点,成为传感领域极具吸引力的候选材料。目前,光纤传感器被广泛应用在航空航天、石油化工及电力系统等领域。经过不断发展,基于不同原理的各种光纤温度传感器被相继提出,如分布式传感器^[1]、光纤光栅型传感器^[2-3]和光纤干涉型传感器^[4-5]等。分布式温度传感器主要用于长距离大范围温度检测,光纤光栅型传感器也可以用于准分布式温度检测,但是这两类传感器的灵敏度相对都较低。光纤干涉计型传感器分为马赫-曾德干涉计(Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[6-7]、法布里-珀罗干涉计(Fabry-Perot interferometer, FPI)^[8-10]、迈克尔逊干涉计(Michelson interferometer, MI)^[11]和萨格纳克干涉计(Sagnac, SI)^[12-13]等。对于小空间高精度温度检测,通常选用光纤干涉型传感器,如FPI干涉计和MI干涉计,然而,受石英材料热膨胀和热光系数偏低的影响,单个全光纤FPI和MI干涉计的温度灵敏度也非常有限。

近年来,研究者将游标效应引入光纤传感技术中以提高光纤干涉计的灵敏度^[14-20]。类似于游标卡尺,当自由光谱范围接近的两个干涉计级联或并联后,干涉谱中将出现包络,且包络随被测参量的平移量远大于单个干涉计,此游标效应称为普通游标效应。当一个干涉计的自由光谱范围约为另一干涉计整数倍(≥ 2)时,级联或并联干涉谱中同样会出现相应的干涉谱包络,且包络随被测参量的平移量远大于单个干涉计,此游标效应称为谐波游标效应。2015年,Zhang等^[21]采用空芯光子晶体光纤与单模光纤(SMF)熔接的方式在同一根光纤内制备了级联的双FPI干涉计,实现了普通游标效应,该传感器温度测量灵敏度达到了1.019 $\text{nm}/^\circ\text{C}$,传感头长度约为8 mm。2019年,Hou等^[22]提出了基于两空气腔并联的光纤温度传感器,借助游标效应,温度灵敏度提高到了17.758 $\text{nm}/^\circ\text{C}$;2021年,Guo等^[23]采用空气腔和石英腔并联的方式实现了普通游标效应,相对于单个石英腔,温度灵敏度提高了7倍。2023年,Li等^[24]将两FPI干涉计并联实现了谐波游标效应,该传感器的温度和应变灵敏度分别为12.8 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 和178.75 $\text{pm}/\mu\text{m}\epsilon$ 。以上并联结构传感器中,两个干涉计均在不同的光纤上,增加了传感器的复杂程度,不仅不利于传感器的小型化和集成化,而且

实际应用带来了不便。

本文采用悬浮芯光纤(suspended-core fiber, SCF)与单模光纤错位熔接的方式,在同一根光纤内成功制备出了基于FPI和MI并联的全光纤温度传感器,且FPI和MI产生了1次谐波游标效应,该传感器的长度仅为584.4 μm 。实验结果表明,在20 $^\circ\text{C}$ ~120 $^\circ\text{C}$ 的温度范围内,该传感器的温度灵敏度为208 $\text{pm}/^\circ\text{C}$,为单个MI干涉计的20.8倍。该传感器在同一根光纤内实现FPI和MI并联,仅为584.4 μm 的传感头长度使其非常易于嵌入被测元器件内部进行温度检测。对于大体积传感器无法使用的小空间温度检测,本传感器仍然可以使用,如高压配电装置内易发热部件温度检测、矿井钻头温度检测、电池温度检测等。

1 传感器制备及原理分析

本文提出的基于FPI和MI并联的全光纤温度传感器如图1(a)所示,该传感器由SMF1依次错位熔接一段SCF和一段SMF2而成,界面M1和M2构成FPI干涉计,界面M1和M3构成MI干涉计,MI干涉计的光程约为FPI干涉计光程的2倍。单模光纤SMF1和SMF2的型号均为SMF-28,其外径为125 μm ,纤芯直径为10 μm ;SCF光纤的截面显微图如图1(b)所示,其外径为125 μm ,纤芯直径为10 μm ,侧孔紧挨着纤芯,其直径为35 μm 。SCF光纤和SMF2光纤的长度选择主要需要考虑如下因素:1)干涉谱包络具有相对较高的对比度;2)干涉谱包络的自由光谱范围小于光源的谱宽。具体制备过程如下:1)将SMF1与SCF错位熔接,错位量为6~9 μm 。在界面M1处,入射光分为3部分,第1部分反射回SMF1,第2部分进入SCF气孔中传输,第3部分进入SCF纤芯中传输。2)切割SCF使其长度为405.5 μm ,然后与SMF2错位熔接。在界面M2处,SCF气孔内传输的信号光小部分反射回SMF1,该部分反射光与界面M1处的反射光构成FPI干涉计。SCF纤芯内传输的信号光在M2界面处大部分进入SMF2内传输;3)切割SMF2使其长度为178.9 μm 。在界面M3处,SMF2纤芯内传输的小部分信号光反射回SMF1,该部分反射光与界面M1处的反射光构成MI干涉计。由M1、M2和M3反射回SMF1的3束反射光的光场强度分别为 E_1 、 E_2 和 E_3 。图1(b)为SCF光纤的截面显微图,图1(c)为采用以上方法制备的全光纤温度传感器的显微图。

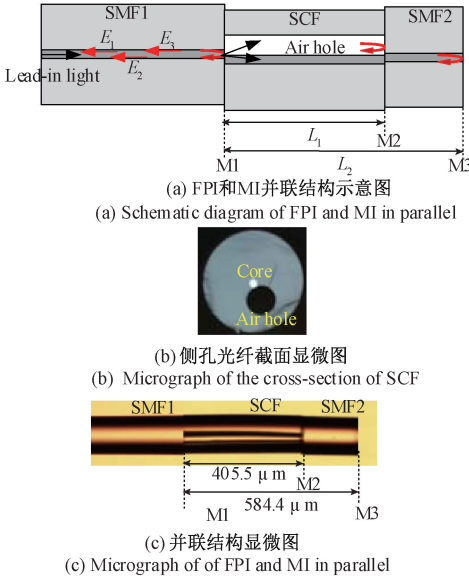


图 1 传感器结构

Fig. 1 Structure of the sensor

由图 1 可知,反射光的总强度 E_r 可表示为:

$$E_r = E_1 + E_2 + E_3 = A_1 + A_2 \exp\left(j \frac{4\pi n_1 L_1}{\lambda}\right) + A_3 \exp\left(j \frac{4\pi n_2 L_2}{\lambda}\right) \quad (1)$$

其中, A_1 、 A_2 和 A_3 分别为光场强度 E_1 、 E_2 和 E_3 的振幅, λ 为入射光波长, n_1 和 n_2 分别为空气和石英的折射率, L_1 为 FPI 干涉计的腔长, L_2 为 SCF 和 SMF2 的总长度。由于本传感器中电场强度 E_1 的幅值 A_1 明显大于 E_2 和 E_3 的幅值 A_2 和 A_3 , 同时忽略对干涉谱形状无影响的部分直流分量。本传感器的反射光总光强 I_r 可表示为 FPI 和 MI 干涉谱的叠加, 即:

$$I_r = E_r \cdot E_r^* \approx I_{FPI} + I_{MI} \quad (2)$$

其中, I_{FPI} 和 I_{MI} 分别为 FPI 和 MI 的干涉谱光强, 可分别表示为:

$$\begin{cases} I_{FPI} = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\left(\frac{4\pi n_1 L_1}{\lambda}\right) \\ I_{MI} = A_1^2 + A_3^2 + 2A_1A_3 \cos\left(\frac{4\pi n_2 L_2}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, FPI 和 MI 的干涉谱第 m 个谷值波长 λ_m 可表示为:

$$\frac{4\pi n_i L_i}{\lambda_m} = (2m + 1)\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

其中, $i=1$ 和 2。当温度变化时, n_i 和 L_i 随之变化, 导致谷值波长 λ_m 也随之变化, 因此, 式(4)对温度求导可知, FPI 和 MI 的温度灵敏度 S_{FPI} 和 S_{MI} 分别为:

$$\begin{cases} S_{FPI} = \frac{d\lambda_m}{dT} = \lambda_m \left(\frac{1}{L_1} \frac{dL_1}{dT} + \frac{1}{n_1} \frac{dn_1}{dT} \right) = \lambda_m \left(\alpha + \frac{\beta_1}{n_1} \right) \\ S_{MI} = \lambda_m \left(\frac{1}{L_2} \frac{dL_2}{dT} + \frac{1}{n_1} \frac{dn_2}{dT} \right) = \lambda_m \left(\alpha + \frac{\beta_2}{n_2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\alpha = dL_i / (L_i dT) = dL_2 / (L_2 dT)$ 为石英的热膨胀系数, $\beta_1 = dn_1 / dT$ 和 $\beta_2 = dn_2 / dT$ 分别为空气和石英的热光系数。考虑到 $n_1 \approx 1$, $n_2 \approx 1.46$, $\alpha \approx 5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$, $\beta_1 \approx -4.4 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$ 和 $\beta_2 \approx 8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 由式(5)计算可知, 在 1550 nm 附近, FPI 和 MI 的温度灵敏度分别约为 0.85 和 10.0 pm/ $^\circ\text{C}$ 。由此可见, 在本传感器中 $S_{MI} \gg S_{FPI}$, 因此, FPI 为参考干涉计, 而 MI 为传感干涉计。

根据自由光谱范围的定义, FPI 和 MI 干涉计的自由光谱范围分别为:

$$\begin{cases} FSR_{FPI} = \frac{\lambda_m^2}{2n_1 L_1} \\ FSR_{MI} = \frac{\lambda_m^2}{2n_2 L_2} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, FPI 和 MI 干涉计的自由光谱范围均与光程成反比。由于在本传感器中 MI 的光程约为 FPI 光程的 2 倍, 因此, FPI 的自由光谱范围约为 MI 自由光谱范围的 2 倍。根据谐波游标效应的定义^[24], 即当一个干涉计的自由光谱范围约为另一干涉计的 $k+1$ 倍 (k 为整数, 且 $k \geq 1$) 时, 两干涉计产生 k 阶谐波游标效应。对于本传感器, $k=1$, 即一阶谐波游标效应, 其干涉谱中将出现如图 2 所示的双包络 (仿真参数如下: $A_1^2 = 0.002$, $A_2^2 = 0.0006$, $A_3^2 = 0.0006$, $n_1 \approx 1$, $n_2 \approx 1.46$, $\alpha \approx 5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$, $\beta_1 \approx -4.4 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$ 和 $\beta_2 \approx 8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), 且每个包络均可近似表示为:

$$I_{Envelope} = D \cos \left[\frac{2\pi(n_2 L_2 - 2n_1 L_1)}{\lambda} \right] \quad (7)$$

其中, D 为常数。由式(7)推导可知, 干涉谱包络的温度灵敏度为:

$$S_{Envelope} = \frac{d\lambda_n}{dT} = \frac{n_2 L_2}{n_2 L_2 - 2n_1 L_1} \left(\alpha + \frac{\beta_2}{n_2} \right) - \frac{2n_1 L_1}{n_2 L_2 - 2n_1 L_1} \left(\alpha + \frac{\beta_1}{n_1} \right) \quad (8)$$

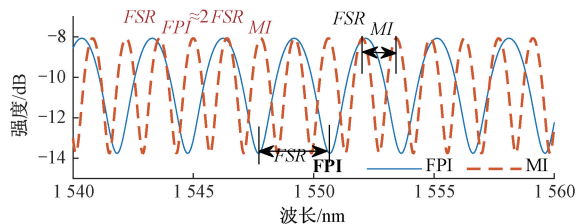
将式(5)代入式(8), 同时考虑到 $n_2 L_2 \approx 2n_1 L_1$ 和 $S_{MI} \gg S_{FPI}$, 则式(8)可进一步表示为:

$$S_{Envelope} = \begin{cases} M^1 S_{MI} (n_2 L_2 > 2n_1 L_1) \\ -M^1 S_{MI} (n_2 L_2 < 2n_1 L_1) \end{cases} \quad (9)$$

其中, M^1 为一阶谐波游标效应的放大倍率, 其定义为:

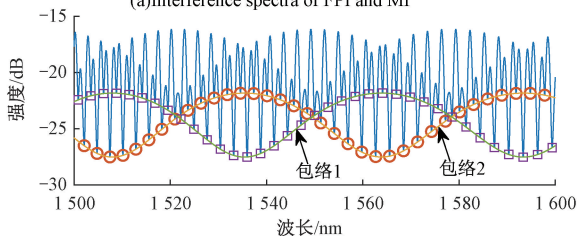
$$M^1 = \frac{FSR_{FPI}}{|FSR_{FPI} - 2FSR_{MI}|} = \frac{n_2 L_2}{|n_2 L_2 - 2n_1 L_1|} \quad (10)$$

式中: FSR_{FPI} 和 FSR_{MI} 分别为 FPI 和 MI 干涉计的自由光谱范围。由式(9)可知,相对于单个 MI 干涉计,本传感器温度灵敏度放大了 M^1 倍;当 $FSR_{FPI} > 2FSR_{MI}$ 时,随温度变化,干涉谱包络与 MI 干涉谱具有相同的波长移动方向,反之,则相反。



(a) 单个FPI和MI的干涉谱

(a) Interference spectra of FPI and MI



(b) 并联结构干涉谱

(b) Interference spectrum of FPI and MI in parallel

图2 干涉谱

Fig. 2 Interference spectra

2 实验及分析

本文搭建的传感器温度实验装置如图3所示,该实验装置由放大自发辐射光源(ASE)、光谱分析仪(OSA,型号为AQ6370C,分辨率为0.02 nm)、光纤环形器和传感头构成。实验过程中传感头放置在温控箱(型号为WGL-30B,分辨率为0.1℃)内。ASE光源发出的信号光经光纤环形器进入由FPI和MI构成的传感头,传感头的反射光由光谱分析仪接收。在显微镜下测得,传感头中SCF的长度 $L_1 = 405.5 \mu\text{m}$, SCF和SMF2的总长度 $L_2 = 584.4 \mu\text{m}$ 。计算可得FPI和MI的光程分别为 $n_1 L_1 = 405.5 \mu\text{m}$ 和 $n_2 L_2 = 853.2 \mu\text{m}$ 。由此可见, $n_2 L_2 \approx 2n_1 L_1$, 且 $n_2 L_2 > 2n_1 L_1$ 。将以上数据代入式(10),可得该传感器的放大倍率 $M^1 \approx 20.2$ 。

在室温下测得本传感器的干涉谱如图4所示,干涉谱中呈现明显对称的双包络,表明FPI干涉计和MI干涉计产生了一阶谐波游标效应。干涉谱包络的自由光谱范围为59.50 nm, FPI干涉计的自由光谱范围约为2.91 nm。对图4所示干涉谱作快速傅里叶变化(fast Fourier transform, FFT),所得频谱如图5所示,频域中两个最强的峰值出现在 0.330 nm^{-1} (Peak A) 和 0.676 nm^{-1} (Peak B) 处,分别对应FPI和MI的干涉谱。Peak B对

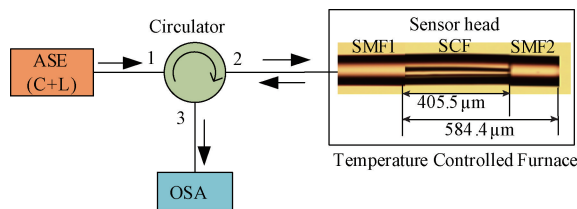


图3 传感器实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the sensor

应的频率(0.676 nm^{-1})约为Peak A(0.330 nm^{-1})对应频率的2倍,且大于2倍,表明MI的光程约为FPI光程的2倍,且大于2倍,即 $n_2 L_2 \approx 2n_1 L_1$ 且 $n_2 L_2 > 2n_1 L_1$ 。该结果与用显微镜下测得FPI和MI长度相吻合。

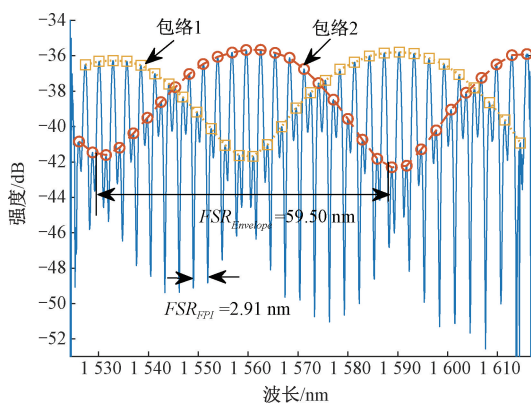


图4 并联双腔干涉谱

Fig. 4 Reflection spectrum of parallel two-cavities

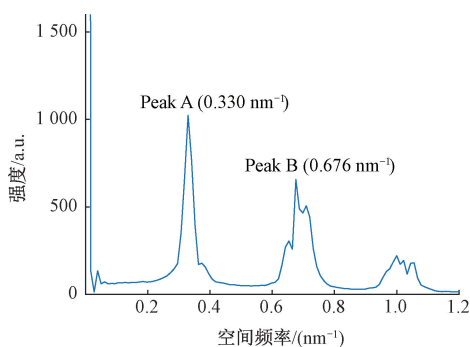


图5 传感器干涉谱的快速傅里叶变换谱

Fig. 5 FFT of the spectrum of the sensor

将传感器放在温控箱内,当温度分别为20℃、70℃和120℃时,由光谱仪测得的本传感器干涉谱如图6所示。当温度为20℃时,1550 nm附近双包络交叉点波长为1545.14 nm,当温度逐渐升高到70℃和120℃时,1550 nm附近干涉谱包络交叉点分别红移到1555.99和1566.41 nm。将温控箱的温度由20℃逐渐升高到120℃,然后由120℃逐渐下降到20℃,每间隔10℃记

录一次传感器干涉谱,图 7 为 1 550 nm 附近干涉谱包络交叉点随温度的变化曲线。由图 7 可知,在 20 ℃ ~ 120 ℃ 温度变化范围内,升温 and 降温过程本传感器的温度灵敏度分别为 208.2 和 207.9 pm/℃,均约为 208 pm/℃。由此可见,本传感器的重复性非常好。本传感器温度灵敏度为单个 MI 干涉计温度灵敏度的(约为 10.0 pm/℃)20.8 倍,为单个 FPI 干涉计温度灵敏度(约为 0.85 pm/℃)的 245 倍。将温控箱设置在 50 ℃,每间隔 60 min 记录一次传感器干涉谱包络交叉点波长,共记录 11 次,结果如图 8 所示。干涉谱交叉点波长平均值为 1 551.24 nm,11 次测量结果的标准偏差为 0.04 nm,表明该传感器具有很好的稳定性。

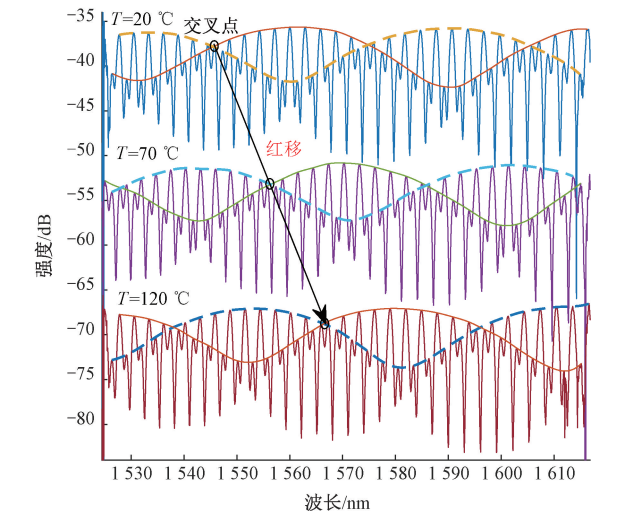


图 6 温度分别为 20℃、70 ℃ 和 120 ℃ 时,传感器干涉谱
Fig. 6 Spectra of the sensor for 20℃、70 ℃ and 120 ℃

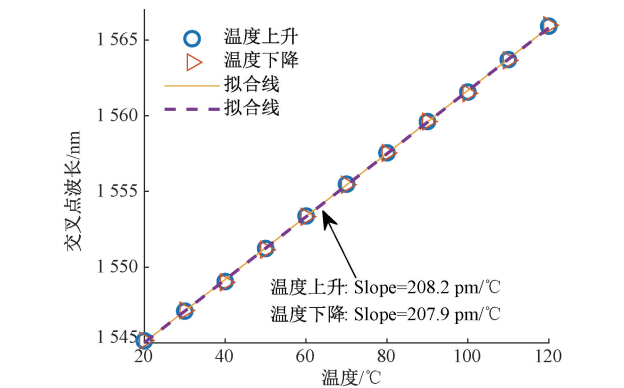


图 7 干涉谱包络交叉点随温度的变化曲线
Fig. 7 Cross-point wavelength shift of spectral envelope versus temperature

本传感器与其他基于游标效应的光纤温度传感器对比结果如表 1 所示,由表 1 可知,只有本传感器与文献[21]和[28]在同一根光纤内实现了游标效应,其他传

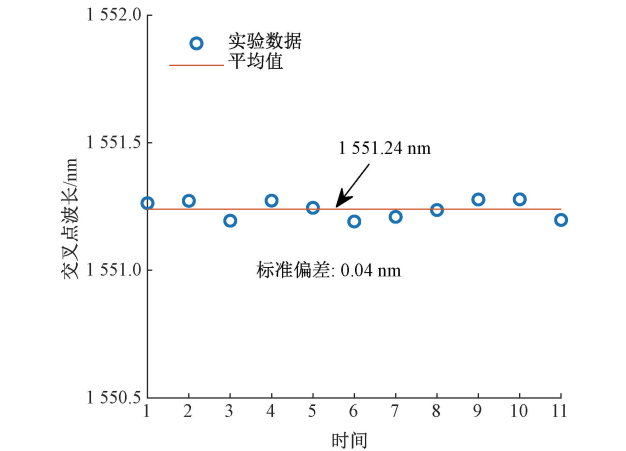


图 8 50 ℃ 时干涉谱包络交叉点多次测量结果
Fig. 8 Multiple measurement results of Cross-point wavelength of spectral envelope at 50 ℃

感器均基于分离的不同光纤实现的游标效应。相比于文献[21]和[28],本传感器的体积更小,主要原因在于本传感器为并联结构,而文献[21]和[28]报道的传感器为级联结构。此外,如果放大倍率相同,本传感器与文献[21]和[28]报道的传感器几乎具有相同的温度灵敏度。文献[26]和[27]报道的传感器的灵敏度明显高于本传感器,但是由于使用了 Sagnac 干涉计,其长度远大于本传感器。文献[25]报道的温度传感器的灵敏度也高于本传感器,但是该传感器不是全光纤传感器,不能用于高温传感。综上所述,本传感器在同一根光纤内实现了 FPI 和 MI 并联,且其长度仅为 584.4 μm。

表 1 基于游标效应光纤温度传感器对比

Table 1 Comparison of temperature sensors based on the Vernier effect

参考	结构		总大小	灵敏度
	同一根光纤内 (是/否)	全光纤 (是/否)		
[21]	是	是	8.1 mm	1.019 nm/℃
[23]	否	是	166 μm and 197 μm	102 pm/℃
[25]	否	否	130.1 μm and 115.8 μm	7.61 nm/℃
[26]	否	是	1.15 m and 1.35 m	3.66 nm/℃
[27]	否	是	2.10 m and 1.99 m	78.984 nm/℃
[28]	是	是	1505 μm	707 pm/℃
本文	是	是	584.4 μm	208 pm/℃

3 结 论

本文提出并制备了一种基于 FPI 和 MI 并联的全光纤温度传感器,该传感器由单模光纤依次错位熔接一段悬浮芯光纤和一段单模光纤而成,且 FPI 的光程约为 MI 光程的 1/2,从而,两干涉计产生了 1 次谐波游标效应。实验结果表明:该传感器干涉谱中出现了具有明显一阶

谐波游标效应特征的双包络,随着温度的升高,干涉谱包络逐渐红移,在 20 °C ~ 120 °C 的温度范围内,其灵敏度为 208 pm/°C,约为单个 MI 干涉计温度灵敏度的 20.8 倍。该传感器是在同一根光纤内实现 FPI 和 MI 并联的全光纤温度传感器,总长度仅约为 584.4 μm,特别适合于小空间温度检测。

参考文献

- [1] LU X, SOTO M A, THÉVENAZ L. Temperature-strain discrimination in distributed optical fiber sensing using phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16059-16071.
- [2] ZHU Y P, SHENG Q W, HAN M. Effect of laser polarization on fiber bragg grating Fabry-Perot interferometer for ultrasound detection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 7102408.
- [3] 詹亚歌, 蔡海文, 向世清, 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(1): 83-86.
ZHAN Y G, CAI H W, XIANG SH Q, et al. Resolution fiber Bragg grating temperature sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 83-86.
- [4] WANG Z R, HUANG L, LIU C, et al. Sensitivity-enhanced fiber temperature sensor based on vernier effect and dual in-line Mach-Zehnder interferometers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(18): 7983-7987.
- [5] LASHARI G A, MUMTAZ F, ZHOU A, et al. Recent advancements and future challenges in hybrid optical fiber interferometers [J]. *Optik*, 2023, 282: 170860.
- [6] HU J, SHAO L Y, GU G Q, et al. Dual Mach-Zehnder interferometer based on side-hole fiber for high-sensitivity refractive index sensing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1-13.
- [7] CHEN F F, JIANG Y, ZHANG L C, et al. Fiber optic refractive index and magnetic field sensors based on microhole-induced inline Mach-Zehnder interferometers [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(4): 045103.
- [8] 汪巧云, 杨静, 高欣宇, 等. 光纤空气隙法布里-珀罗标准具透射谱线型研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0412001.
WANG Q Y, YANG J, GAO X Y, et al. Research on the lineshape of transmission spectra from fiber air gap Fabry-Perot etalons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0412001.
- [9] 季红程, 谢品华, 徐晋, 等. 基于可调谐法布里-珀罗干涉仪的大气二氧化碳测量方法研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1812004.
JI H CH, XIE P H, XU J, et al. Measuring method of atmospheric carbon dioxide based on tunable Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1812004.
- [10] 罗春晖, 陈晓旭, 吴舜. 基于游标效应的并联法布里-珀罗干涉仪传感特性的分析 [J]. *光学学报*, 2023, 43(5): 0506002.
LUO CH H, CHEN X X, WU SH. Analysis of sensing characteristics of parallel Fabry-Pérot interferometer based on vernier effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 0506002.
- [11] ZHANG S X, LIU Y, GUO H Y, et al. Highly sensitive vector curvature sensor based on two juxtaposed fiber Michelson interferometers with Vernier-like effect [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 19(6): 2148-2154.
- [12] WU B Q, ZHAO C L, XU B, et al. Optical fiber hydrogen sensor with single Sagnac interferometer loop based on Vernier effect [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018, 255(3): 3011-3016.
- [13] YANG Y Q, WANG Y G, ZHAO Y X, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor by hybrid cascaded configuration of a Sagnac loop and a FP cavity [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33290-33296.
- [14] 刘福禄, 张钰民, 庄炜, 等. 基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器 [J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1506002.
LIU F L, ZHANG Y M, ZHUANG W, et al. Fiber temperature sensor with composite structure based on vernier effect and substrate sensitization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1506002.
- [15] KONG L X, ZHANG Y X, ZHANG W G, et al. High-sensitivity and fast-response fiber-optic micro-thermometer based on a plano-concave Fabry-Pérot cavity filled with PDMS [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 281: 236-242.
- [16] 方莎莎, 吴许强, 张刚, 等. 基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器 [J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0106004.
FANG SH SH, WU X Q, ZHANG G, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the vernier effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106004.
- [17] GOMES A D, FERREIRA M S, BIERLICH J, et al. Optical harmonic Vernier effect: A new tool for high performance interferometric fiber sensors [J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5431.
- [18] ZHAO Y, WANG X X, LV R Q, et al. Highly sensitive reflective Fabry-Perot magnetic field sensor using

- magnetic fluid based on vernier effect [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-8.
- [19] 杨翔文, 罗彬彬, 石胜辉, 等. 基于虚拟游标效应的夹层多模光纤马赫-曾德尔干涉仪高灵敏温度传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1706002.
YANG X W, LUO B B, SHI S H, et al. High-sensitivity temperature sensor based on sandwich multimode fiber Mach-Zehnder interferometer with virtual vernier effect [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1706002.
- [20] 李玉洁, 罗彬彬, 邹雪, 等. 基于双螺旋微纳光纤耦合器的光学游标传感特性研究[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1406001.
LI Y J, LUO B B, ZOU X, et al. Sensing characteristics of optical vernier of double-helix micro-nano optical fiber coupler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 1406001.
- [21] ZHANG P, TANG M, GAO F, et al. Simplified hollow-core fiber-based Fabry-Perot interferometer with modified vernier effect for highly sensitive high-temperature measurement [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 710021.
- [22] HOU L Y, ZHAO C L, XU B, et al. Highly sensitive PDMS-filled Fabry-Perot interferometer temperature sensor based on the Vernier effect[J]. Applied Optics, 2019, 58(18): 4858-4865.
- [23] GUO Y, SU H, ZHANG Y, et al. High-temperature parallel double-FPIs sensor based on Vernier-effect[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(9): 095203.
- [24] LI Z R, DANG W J, DAN J X, et al. High-sensitivity interferometric high-temperature strain sensor based on optical harmonic Vernier effect [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 79: 103361.
- [25] PAN R, LIU M X, BIAN Y, et al. High-sensitive temperature sensor with parallel PDMS-filled FPIs based on dual Vernier effect [J]. Optics Communications, 2022, 518: 128284.
- [26] LIU S, LU G W, LV D Y, et al. Sensitivity enhanced temperature sensor with cascaded Sagnac loops based on harmonic Vernier effect [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 66: 102654.
- [27] ZHAO Y F, DAI M L, CHEN Z M, et al. Ultrasensitive temperature sensor with Vernier-effect improved fiber Michelson interferometer [J]. Optics Express, 2021, 29(18): 1090-1101.
- [28] LIU F L, ZHANG Y M, MENG F Y, et al. Complex optical fiber sensor based on the Vernier effect for temperature sensing [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102424.

作者简介



杨玉强, 2004~2009 年于哈尔滨工业大学获得硕士和博士学位, 现为广东海洋大学教授, 主要研究方向为光学传感与检测技术研究。

E-mail: yuqiangy110@sina.com

Yang Yuqiang received the M. Sc. and Ph. D. degrees from Harbin Institute of Technology from 2004 to 2009. He is currently a professor at Guangdong Ocean University. His main research interests include optical sensing and detection technology research.



牟小光 (通信作者), 2009 年于武汉理工大学获硕士学位, 现为广东海洋大学副教授, 主要研究方向为光学传感与检测技术研究。

E-mail: xd_gdou@sina.com

Mu Xiaoguang (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 2009. He is currently an associate professor at Guangdong Ocean University. His main research interests include optical sensing and detection technology.



张钰颖, 2020 年于重庆三峡学院获电子信息工程专业学士学位, 现为广东海洋大学硕士研究生, 主要研究方向为光学传感与检测技术研究。

E-mail: yuyingzhang2022@163.com

Zhang Yuying received her B. Sc. degree in Electronic Information Engineering from Chongqing Three Gorges University in 2020. She is currently a M. Sc. candidate in Guangdong Ocean University. Her main research interests include optical sensing and detection technology.