

文章编号 1004-924X(2023)24-3531-09

基于增强型游标效应的光纤温度传感器

高佳乐^{1,4}, 杨玉强^{1,2,4*}, 牟小光^{3*}, 张钰颖⁴, 李雨婷⁴, 李依潼⁴

- (1. 广东海洋大学 深圳研究院, 广东 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, 广东 湛江 524088;
3. 广东海洋大学 机械工程学院, 广东 湛江 524088;
4. 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, 广东 湛江 524088)

摘要:提出了一种基于增强型游标效应增敏的高灵敏度光纤温度传感器,该传感器由对温度均敏感的法布里-珀罗干涉计(Fabry-Perot Interferometer, FPI)与萨格奈克干涉计(Sagnac Interferometer, SI)级联构成。FPI为聚二甲基硅氧烷(PDMS)填充空芯光纤(HCF)形成的PDMS腔,SI由单模光纤环内熔接一段熊猫光纤而成。FPI和SI具有相反的温度响应,随温度的升高,FPI的干涉谱逐渐红移,而SI的干涉谱逐渐蓝移,从而产生增强型游标效应,其温度灵敏度远大于单个FPI或单个SI,且放大倍率明显高于普通游标效应。实验结果表明:36~39℃温度范围内,该传感器温度灵敏度达到了一57.85 nm/℃,分别为单个FPI和SI灵敏度的44.8倍和30.8倍,分别为普通游标效应放大倍率的2.56倍和1.66倍。该传感器具有灵敏度高、稳定性好、制备成本低等优点,具有非常好的应用前景。

关键词:光纤传感器;法布里-珀罗干涉计;萨格奈克干涉计;增强型游标效应;聚二甲基硅氧烷

中图分类号:O436 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233124.3531

Fiber-optic temperature sensor based on enhanced Vernier effect

GAO Jiale^{1,4}, YANG Yuqiang^{1,2,4*}, MU Xiaoguang^{3*}, ZHANG Yuying⁴, LI Yuting⁴, LI Yitong⁴

- (1. Shenzhen Institute, Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Equipment for South China Sea Marine Ranching, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
3. College of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
4. Research Center of Guangdong Smart Oceans Sensor Networks and Equipment Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

* Corresponding author, E-mail: yuqiangy110@sina.com; xd_gdou@sina.com

Abstract: A high-sensitivity fiber temperature sensor based on enhanced Vernier effect is proposed. The proposed sensor consists of a cascaded Fabry-Perot interferometer (FPI) and Sagnac interferometer (SI). The FPI was a PDMS cavity formed by filling polydimethylsiloxane (PDMS) into hollow-core fiber

收稿日期:2023-08-06;**修订日期:**2023-09-11.

基金项目:广东省自然科学基金面上项目资助(No. 2023A1515011212, No. 2022A1515011603);深圳市基础研究面上项目资助(No. JCYJ20210324122813036, No. JCYJ20220530162200001);广东省普通高校重点领域专项资助(No. 2021ZDZX1015);广东海洋大学研究生教育创新计划资助项目(No. 202328);广东海洋大学科研启动经费资助项目(No. 060302112009)

(HCF), and SI was formed by fusing a section of Panda fiber inside a single-mode fiber ring. FPI and SI have opposite temperature responses. With increasing temperature, the interference spectrum of FPI will red-shift, whereas that of SI will blue-shift. Therefore, when FPI and SI are cascaded, an enhanced Vernier effect will be generated, with a temperature sensitivity much greater than FPI or SI alone. The magnification of the enhanced Vernier effect is significantly larger than that of the ordinary Vernier effect. Experimental results show that the sensitivity of the sensor is $-57.85 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ in the temperature range of $36 - 39^\circ\text{C}$, which is 44.8 and 30.8 times that of FPI and SI alone, respectively. The sensitivity magnifications are 2.56 and 1.66 times those of ordinary Vernier effect, respectively. The sensor has the advantages of high sensitivity, good stability, low preparation cost, and very good application prospects.

Key words: optical fiber sensor; Fabry-Perot Interferometer(FPI); Sagnac Interferometer(SI); enhanced vernier effect; Polydimethylsiloxane

1 引 言

与传统温度传感器相比,光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰等优点^[1-7],特别适合应用于复杂恶劣环境。灵敏度是光纤传感器的重要指标,是影响测量结果的重要因素,实现高灵敏度测量一直是研究者追求的目标^[8-10]。

光学游标效应是提高光纤传感器灵敏度的一种有效方法,近年来被研究者广泛采用^[11-14]。当自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)接近但不相等的两个光纤干涉计级联或并联时,叠加后的干涉谱将呈现包络。干涉谱包络随被测参量的平移量远大于单个干涉计,该现象与游标卡尺的游标效应相似,被称为光学游标效应。若两个干涉计中,仅一个干涉计对被测参量敏感,则称为普通游标效应。2021年, Pan 等人^[15]提出了一种基于两个法布里-珀罗干涉计(Fabry-Perot Interferometer, FPI)并联的光纤温度传感器,该传感器将聚二甲基硅氧烷(PDMS)腔作为传感FPI,空气腔作为参考FPI,实现了游标效应,放大倍率为9.8;2022年, Su 等人^[16]提出一种基于 Mach-Zehnder 干涉计(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)和萨格奈克干涉计(Sagnac Interferometer, SI)级联的光纤温度传感器,将 MZI 作为参考干涉计,利用游标效应温度灵敏度达到了 $12.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

为了进一步提高灵敏度,研究者提出了增强型游标效应,即两个干涉计均对被测参量敏感,

且具有相反的响应。2020年, Lang 等人^[17]采用两FPI级联的方式实现了高灵敏度温度传感,该传感器中两FPI对温度具有相反的温度响应,利用增强型游标效应,该传感器温度灵敏度达到了 $-39.21 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;2021年, Luo 等人^[18]提出了一种基于光纤 SI 和 MZI 级联的高灵敏度温度传感器,该传感器中 SI 和 MZI 同样具有相反的温度响应,从而产生增强型游标效应,在 $25 \sim 33^\circ\text{C}$ 范围内灵敏度达到了 $20.86 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;2022年, Zhu 等人^[19]利用 FPI 和 MZI 具有相反气压响应的特点,采用级联的方式实现了高灵敏度气压检测。同年,本课题组将两个对温度具有相反响应的 PD-MS 腔并联实现了增强型游标效应,实验结果表明,该传感器的温度灵敏度放大倍率为 10.7,明显高于传统游标效应^[20]。以上研究可知,实现增强型游标效应的关键在于如何使两干涉计对被测参量具有相反的响应。

本文提出了一种基于增强型游标效应的高灵敏度光纤温度传感器,该传感器由具有相反温度响应的 FPI 与 SI 级联构成。FPI 为 PDMS 填充空芯光纤(Hollow-Core Fiber, HCF)形成的 PDMS 腔, SI 由单模光纤环内熔接一段熊猫光纤而成。随温度的增加, FPI 的干涉谱逐渐红移,而 SI 的干涉谱逐渐蓝移,从而产生了增强型游标效应。实验结果表明: $36 \sim 39^\circ\text{C}$ 范围内, 单个 FPI 和 SI 的灵敏度分别为 $1.29 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $-1.88 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 而级联后温度灵敏度为 $-57.85 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。相对于单个 FPI 和 SI, 该传感器灵敏度分别放大了 44.8 倍和 30.8 倍, 是相应普通游标效应放大

倍率的 2.56 倍和 1.66 倍。

2 传感器结构与工作原理

基于 FPI 和 SI 级联的光纤温度传感器原理如图 1 所示,宽带光源发出的信号光经光纤环形器后进入 FPI, FPI 的反射光经光纤环形器后进入 SI, FPI 和 SI 的叠加干涉谱由光谱仪接收。FPI 为由 PDMS 填充一端与 SMF 熔接的 HCF 形成的 PDMS 腔, 信号光在 PDMS 腔的两个界面 M_1 和 M_2 间反射形成 FPI。PDMS 由弹性聚合物(Sylgard 184-a)和固化剂(Sylgard 184-b)按照 10:1 的比例混合而成, 具有超高的热光系数和热膨胀系数。SI 由环形单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)内熔接特定长度的熊猫光纤构成。利用熊猫光纤的双折射效应, 传输方向相反的两束光在传播过程中会产生相位差, 输出的光谱为双光束干涉谱。由于 FPI 和 SI 对温度敏感, 具有相反的温度响应, 级联产生增强型游标效应。

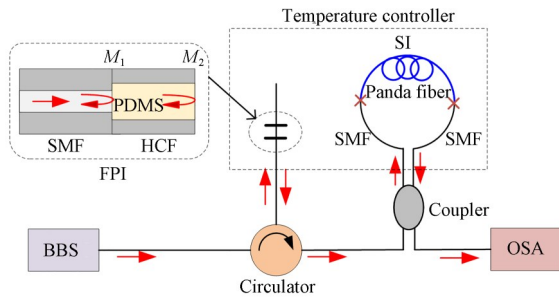


图 1 基于增强型游标效应温度传感器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the proposed temperature sensor based on enhanced vernier effect

在 PDMS 腔形成的 FPI 中, 由于 PDMS 腔的两个界面 M_1 和 M_2 的反射率都比较低, 因此 FPI 干涉可简化为双光束干涉, 其干涉谱可以表示为^[21]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi n L_1}{\lambda}\right), \quad (1)$$

其中: I_1 和 I_2 分别是面 M_1 和面 M_2 反射回 SMF 的光强, $n=1.41$ 为 PDMS 的折射率, L_1 为 PDMS 腔的腔长, λ 为干涉谱峰值波长。

由公式(1)可知, FPI 的自由光谱范围和灵敏

度分别为:

$$FSR_{FPI} = \frac{\lambda_m^2}{2nL_1}, \quad (2)$$

$$S_{FPI} = \frac{d\lambda_m}{dT} = \lambda_m \left(\frac{1}{L_1} \frac{dL_1}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) = \lambda_m \left(\alpha + \frac{\beta}{n} \right), \quad (3)$$

其中: λ_m 为 FPI 干涉谱的第 m 个波峰或波谷的波长(通常选 1 550 nm 附近的波峰或波谷), $\alpha \approx 9.6 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 和 $\beta \approx -5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 分别为 PDMS 的热膨胀系数和热光系数^[22]。将以上参数代入公式(3)可知, $S_{FPI} > 0$, 即随着温度的升高, FPI 的干涉谱向长波方向移动。

SI 的干涉谱可表示为^[23]:

$$I_{SI} = \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi B L_2}{\lambda}\right) \right] / 2, \quad (4)$$

其中: B 为熊猫光纤的双折射系数, L_2 为熊猫光纤的长度。由公式(4)可知, SI 的自由光谱范围^[23]和温度灵敏度^[24]分别为:

$$FSR_{SI} = \frac{\lambda_n^2}{B L_2}, \quad (5)$$

$$S_{SI} = \frac{d\lambda_n}{dT} = \frac{\lambda_n}{B} \frac{dB}{dT}, \quad (6)$$

其中: λ_n 为 SI 干涉谱的第 n 个波峰或波谷的波长(通常选 1 550 nm 附近的波峰或波谷)。由于熊猫光纤的双折射系数随温度的增大而减小, 因此, $S_{SI} < 0$, 即随着温度的升高, SI 的干涉谱向短波方向移动。

当干涉谱强度用 dB 表示时, 光谱仪接收到的干涉谱为 FPI 和 SI 干涉谱的叠加, 即:

$$I = A + B \cos\left(\frac{4\pi n L_1}{\lambda}\right) + C \cos\left(\frac{2\pi B L_2}{\lambda}\right), \quad (7)$$

其中: A 为直流分量, B 和 C 分别为 FPI 和 SI 干涉谱的幅值。当 FPI 和 SI 的自由光谱范围接近但不相等时, 将产生游标效应, 从而, 级联干涉谱将呈现包络现象, 该包络可表示为:

$$I_{\text{envelope}} = D \cos\left[\frac{2\pi(2nL_1 - BL_2)}{\lambda}\right]. \quad (8)$$

由公式(8)可知, 干涉谱包络的自由光谱范围为:

$$FSR_{\text{envelope}} = \frac{\lambda^2}{2nL_1 - BL_2}. \quad (9)$$

干涉谱包络自由光谱范围与 FPI 和 SI 自由光谱范围的关系为:

$$FSR_{\text{envelope}} = M_1 \cdot FSR_{\text{FPI}} = M_2 \cdot FSR_{\text{SI}}, \quad (10)$$

其中, M_1 和 M_2 分别为 SI 和 FPI 作为参考干涉计时, 游标效应的放大倍率, 也称为普通游标效应放大倍率, 可分别表示为:

$$S_{\text{envelope}} = \begin{cases} -M_1 \cdot S_{\text{FPI}} + M_2 \cdot S_{\text{SI}} = -M_1' \cdot S_{\text{FPI}} = M_2' \cdot S_{\text{SI}} & (FSR_{\text{FPI}} > FSR_{\text{SI}}) \\ M_1 \cdot S_{\text{FPI}} - M_2 \cdot S_{\text{SI}} = M_1' \cdot S_{\text{FPI}} = -M_2' \cdot S_{\text{SI}} & (FSR_{\text{FPI}} < FSR_{\text{SI}}) \end{cases}, \quad (12)$$

其中: M_1' 和 M_2' 分别为相对于单个 FPI 和 SI, 级联干涉计灵敏度的实际放大倍率。由于 $S_{\text{FPI}} > 0$ 且 $S_{\text{SI}} < 0$, 从而, $M_1' > M_1$, $M_2' > M_2$, 因此, 该传感器产生的游标效应为增强型游标效应。

对该传感器的温度特性进行仿真分析, 仿真参数分别是: $I_1 = 9 \times 10^{-4}$, $I_2 = 2 \times 10^{-2}$, $\text{dB/dT} = 6.1 \times 10^{-7}$, $B = 5.06 \times 10^{-4}$, $L_1 = 144 \mu\text{m}$, $L_2 = 8.48 \times 10^5 \mu\text{m}$, $n = 1.41$, $\alpha = 9.6 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, $\beta = -5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, $\lambda_m = 1550 \text{ nm}$ 。图 2 为 FPI, SI 和级联结构的干涉谱, 由图 2 可知, 在 1550 nm 附近, FPI 和 SI 的自由光谱范围分别约为 5.92 nm 和 5.60 nm。由于 FPI 和 SI 的自由光谱范围接近, 两干涉计产生游标效应, 级联后干涉谱中出现包络。干涉谱包络的自由光谱范围约为 103.60 nm, 由公式 (11) 计算可知普通游标效应放大倍率为: $M_1 \approx 17.5$, $M_2 \approx 18.5$ 。

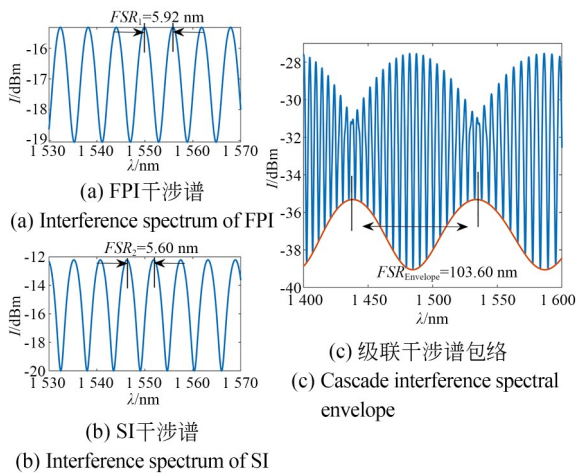


图 2 FPI, SI 和级联结构的干涉谱

Fig. 2 Interference spectrum of FPI, SI and Cascade

图 3 为升温前后 FPI 和 SI 的干涉谱变化, 结果表明 FPI 和 SI 具有相反的温度响应。当温度升高 1°C 时, FPI 的干涉谱呈现红移现象, 移动量

$$\begin{cases} M_1 = \frac{FSR_{\text{SI}}}{|FSR_{\text{SI}} - FSR_{\text{FPI}}|} \\ M_2 = \frac{FSR_{\text{FPI}}}{|FSR_{\text{FPI}} - FSR_{\text{SI}}|} \end{cases}. \quad (11)$$

由于在本传感器中, FPI 和 SI 均对温度敏感, 因此, 级联干涉谱包络的温度灵敏度为:

为 0.92 nm; SI 的干涉谱呈现蓝移现象, 移动量为 -1.88 nm 。图 4 为升温前后级联干涉谱包络的变化, 结果表明当温度升高 1°C 时, 干涉谱包络呈

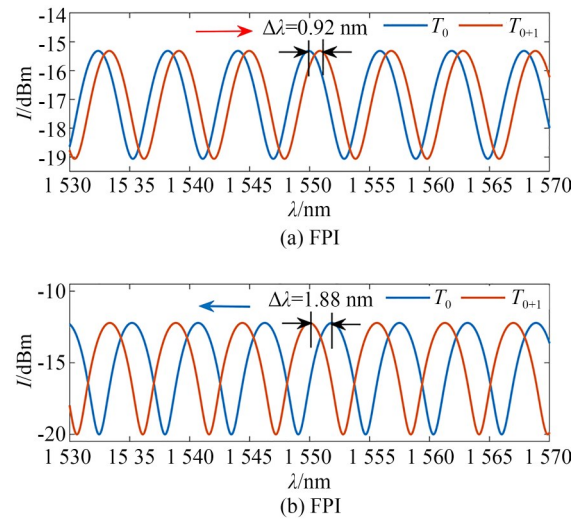


图 3 不同温度下的干涉谱

Fig. 3 Interference spectra at different temperatures

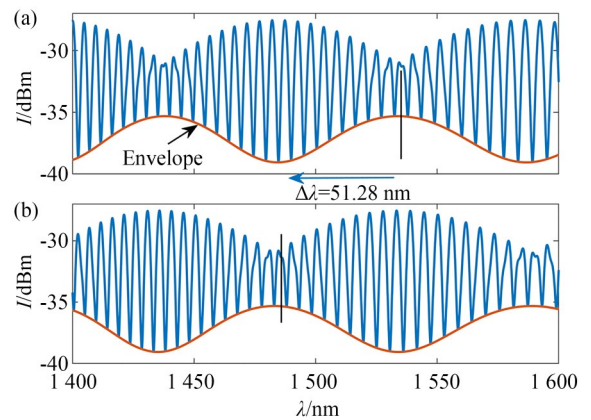


图 4 不同温度下级联传感器的干涉谱 (a) T_0 $^\circ\text{C}$; (b) T_{0+1} $^\circ\text{C}$

Fig. 4 Interference spectra of cascade sensors at different temperatures (a) T_0 $^\circ\text{C}$; (b) T_{0+1} $^\circ\text{C}$

现蓝移现象,蓝移量为 51.28 nm。由公式(12)计算可知该传感器游标效应的实际放大倍率为: $M_1'=55.7>M_1, M_2'=27.3>M_2$,由此可见,该传感器产生增强型游标效应。

3 实验及分析

实验装置如图 1 所示,该实验系统由宽带光源(型号:Golight 伽蓝特;输出功率:12.80 mW;波长范围:1 450~1 650 nm;功率谱密度:-17.0 dBm/nm);光谱仪(型号:Ceyear 6362D;波长范围:600~1 700 nm;最高分辨率:0.02 nm)、光纤环形器、光纤耦合器、FPI和SI级联传感器、温控箱(型号:WGL-30B、温度精度 0.1 °C)构成。宽带光源发出的信号光经过光纤环形器进入 FPI,信号光被反射回来经光纤耦合器进入 SI,叠加干涉谱被光谱仪接收。将 FPI 和 SI 放置在温控箱内进行温度测试,通过光谱仪观察温度变化时级联干涉谱包络随温度的变化情况。其中 FPI 的制作过程如下:(1)将一段 SMF 和一段 HCF 对齐熔接;(2)在光学显微镜下将 HCF 切割成所需的长度;(3)将配置好的液态 PDMS 用吸管滴在 HCF 端面;(4)通过毛细现象使液态 PDMS 逐渐充满 HCF,使用酒精棉擦除多余 PDMS;(5)放入 80 °C 温控箱内加热 1 h 使其固化。SI 的制作过程如下:首先,利用光纤切割刀将熊猫光纤切割成预定长度,且两端切割面平整;然后,将熊猫光纤的两端分别与光纤耦合器的两个输出端熔接。从而,形成了基于光纤耦合器和熊猫光纤的 SI 干涉计。FPI 和 SI 的实物图如图 5 所示。

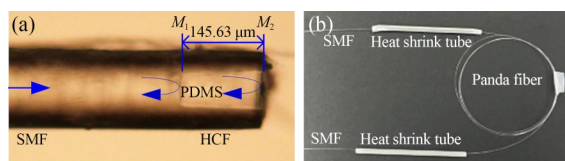
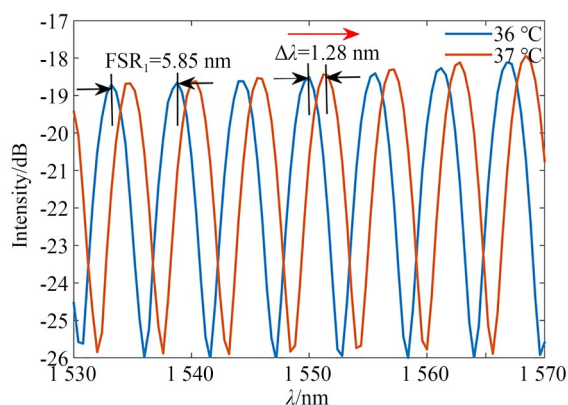


图 5 FPI 显微镜图(a)和 SI 实物图(b)

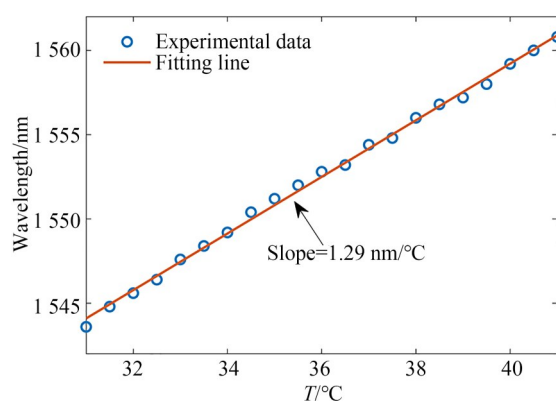
Fig. 5 FPI microscope drawing (a) and SI physical drawing (b)

对 FPI 和 SI 及其级联传感器的温度传感性能进行实验研究。图 6(a)和图 6(c)分别为 36 °C 和 37 °C 时 FPI 和 SI 的干涉谱。FPI 和 SI 干涉谱的自由光谱范围分别是 5.85 nm 和 5.55 nm,利用公式(2)和公式(5)可计算出 FPI 与 SI 对应的腔长分别约为 145.63 μm 和 855 mm。当温度由 36 °C 升高到 37 °C 时, FPI 的干涉谱明显红移,而 SI 的干涉谱明显蓝移,移动量分别约为 1.28 nm 和 -1.87 nm。图 6(b)表示在 31~41 °C 的范围内, 1 550 nm 附近 FPI 干涉谱峰值随温度的变化曲线,拟合结果表明 FPI 的温度灵敏度约为 1.29 nm/°C。该实验结果略高于仿真结果 0.92 nm/°C,原因主要在于本实验配置的 PDMS 的热光和热膨胀系数与仿真所用数据存在差异。图 6(d)为 31~41 °C 温度范围内, SI 的干涉谱随温度的变化曲线,拟合结果表明 SI 的温度灵敏度约为 -1.88 nm/°C,该实验结果与仿真分析的灵敏度基本一致。图 6(e)为 36~39 °C 时 FPI 和 SI 级联结构的干涉谱,干涉谱中明显的包络现象表明 FPI 和 SI 级联产生了游标效应;干涉谱包络随温度增加而蓝移,温度增加 1 °C 的蓝移量为 57.46 nm。图 6(f)为 36~39 °C 范围内,级联结构干涉



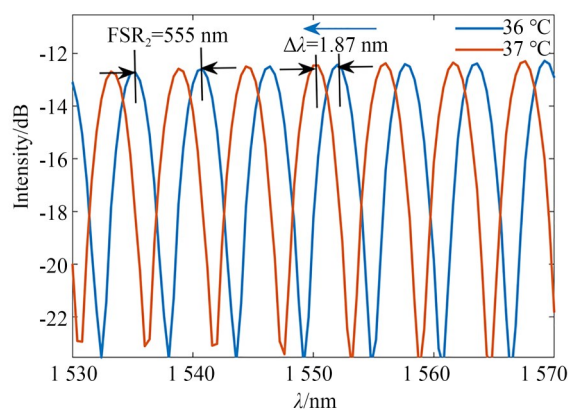
(a) 36 °C 和 37 °C 下 FPI 的干涉谱

(a) Interference spectra of FPI at 36 °C and 37 °C



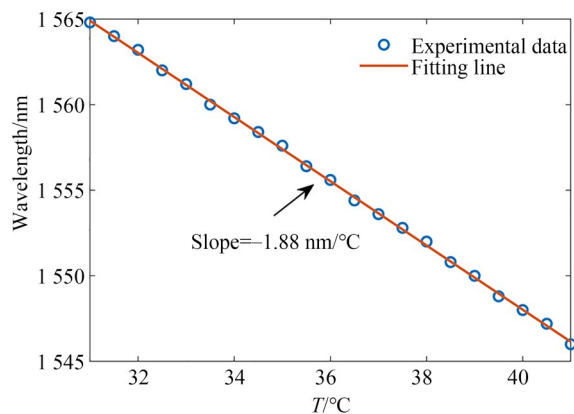
(b) FPI 干涉谱峰值波长随温度变化曲线

(b) Peak wavelength of FPI interference spectrum with temperature



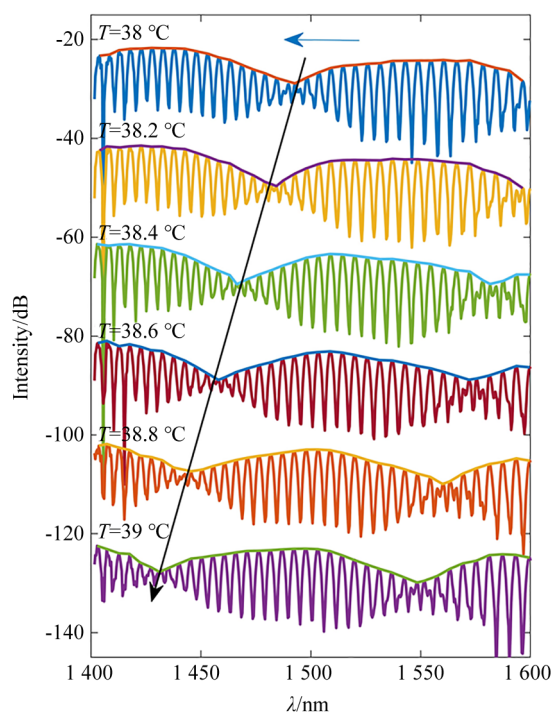
(c) 36 °C和37 °C下SI的干涉谱

(c) Interference spectra of SI at 36 °C and 37 °C



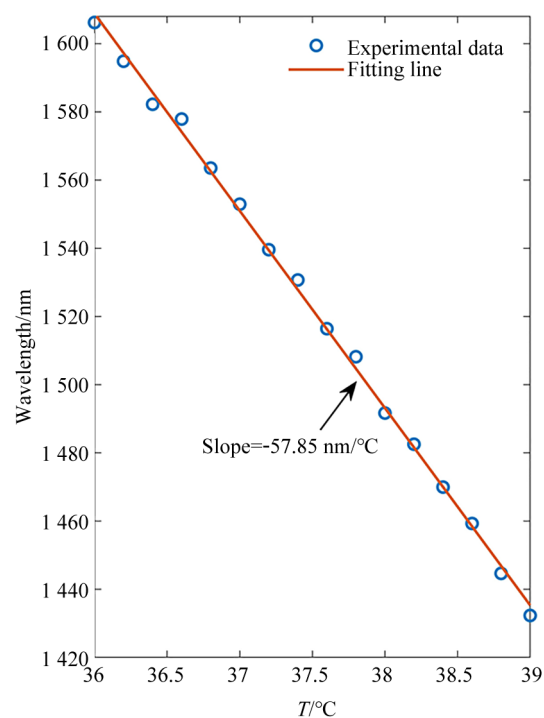
(d) SI干涉谱峰值波长随温度变化曲线

(d) Peak wavelength of SI interference spectrum with temperature



(e) 38~39 °C下级联传感器的干涉谱

(e) Interference spectra of cascade sensors at 38~39 °C



(f) 级联干涉谱峰值波长随温度变化曲线

(f) Variation curve of peak wavelength of interference spectra with temperature after cascading

图 6 不同温度下 FPI, SI, 级联传感器的干涉谱以及其干涉谱峰值波长随温度变化情况

Fig. 6 Interference spectra and peak wavelength curves of FPI, SI, cascade sensors at different temperatures

谱峰值波长随温度的变化曲线。拟合结果表明级联结构的温度灵敏度为 $-57.85 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$, 该实验结果略高于仿真结果 $-51.28 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$, 主要原因在于 FPI 的实际灵敏度与理论仿真结果存在差异造成的。将以上实验结果代入公式(12), 计算可得 $M_1' = 44.8$, $M_2' = 30.8$, 即级联结构传感器的实际温度灵敏度分别为单个 FPI 和单个 SI 的 44.8 倍和 30.8 倍, 分别为普通游标效应放大

倍率的 2.56 倍 ($M_1 = 17.5$) 和 1.66 倍 ($M_2 = 18.5$)。由此可见, 该传感器产生了增强型游标效应, 灵敏度放大倍率明显高于普通游标效应。

为了进一步研究该传感器重复性, 将其放入温控箱内进行了升降温实验, 结果如图 7 所示。温度由 36°C 升高至 39°C , 然后逐渐降温至 36°C , 在此过程中每隔 0.2°C 记录一次 1550 nm 附近干涉谱包络的峰值波长, 并将所得数据进行线性拟

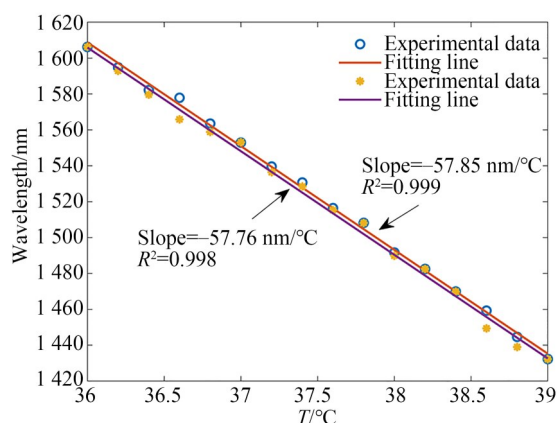


图7 升降温过程干涉谱包络峰值随温度变化曲线

Fig. 7 Peak wavelength shift of spectral envelope with temperature rising and falling

合。实验结果表明,升温 and 降温过程级联结构的温度灵敏度分别为 $-57.85 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-57.76 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,升温 and 降温过程灵敏度的相对误差约为 0.15% 。升温曲线线性拟合度为 0.999 ,降温曲线线性拟合度为 0.998 ;对于单个数据点而言,相对于拟合曲线,最大偏差为 5.39 nm ,该偏差与温控箱的精度 0.1°C 相符。为研究传感器的稳定性,将温控箱控制在 37°C ,每间隔 60 min ,记录一次传感器干涉谱,共记录 10 组数据,最后将测得的 10 次干涉谱峰值数据绘制在图 8 中,发现干涉谱包络峰值均在 1550.56 nm 附近,所有数据点相对误差均小于 0.03% 。实验结果表明本传感

器具有良好的稳定性。

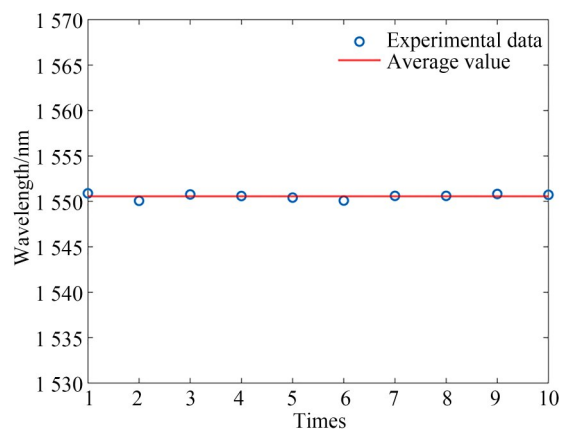


图8 稳定性实验

Fig. 8 Stability experiment

表 1 对基于游标效应光纤温度传感器的性能进行对比分析。由表 1 可知,相对于与其他传感器,本传感器的灵敏度最高。文献[23-26]为基于普通游标效应的光纤温度传感器,级联/并联的两干涉计中,仅 SI 干涉计对温度敏感,因此温度灵敏度放大倍率小于本传感器。与本传感器相似,文献[17-18, 20, 27]都是基于增强型游标效应的光纤温度传感器,但由于单个干涉计的温度灵敏度相对较低,因此增强型游标效应增敏后的温度灵敏度低于本传感器。

表 1 游标效应温度传感器结构与灵敏度比较

Tab. 1 Comparison of structure and sensitivity of Vernier effect temperature sensors

Year	Configuration	Range/ $^{\circ}\text{C}$	Sensitivity ($\text{nm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Reference
2017	FPI and SI cascaded	42~44	-29	[23]
2020	FPI and SI cascaded	23~25	10.64	[25]
2021	FPI and SI cascaded	30~32	-14.63	[26]
2020	Two cascaded FPIs	34.3~36.1	-39.21	[17]
2021	MZI and SI cascaded	25~33	20.86	[18]
2022	Two parallel FPIs	50~60	-14.6	[20]
2022	Two parallel FPIs	34~39	7.61	[27]
2023	FPI and SI cascaded	36~39	-57.8	This work

4 结 论

本文提出了一种基于增强型游标效应的光纤温度传感器,该传感器由对温度均敏感的 FPI

和 SI 级联构成。随着温度升高, FPI 的干涉谱逐渐红移,而 SI 的干涉谱逐渐蓝移,从而产生增强型游标效应。实验结果表明,该传感器的温度灵敏度为 $-57.85 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,分别为单个 FPI 和单个

SI 的 44.8 倍和 30.8 倍,分别为普通游标效应放大倍率的 2.56 倍和 1.66 倍。该传感器在小范

围、高精度温度检测方面具有非常好的应用前景。

参考文献:

- [1] 汪柯红,余洋,王洋,等. 空芯光纤的双机理温度传感特性比较[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 1106001.
WANG K H, YU Y, WANG Y, *et al.* Comparative study on temperature sensing characteristics of dual mechanisms in hollow core fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 1106001. (in Chinese)
- [2] 蔡礼邹,覃亚丽,蔡小磊,等. 基于游标原理的法布里-珀罗温度传感器的增敏方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1106004.
CAI L Z, QIN Y L, CAI X L, *et al.* Sensitization method of Fabry-Perot temperature sensor based on vernier principle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1106004. (in Chinese)
- [3] 郭海若,刘琨,江俊峰,等. 基于可调谐激光器的光纤高低温力热复合多参量传感系统[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1906003.
GUO H R, LIU K, JIANG J F, *et al.* Optical Fiber high and low temperature mechanical and thermal multi-parameter sensing system based on tunable laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1906003. (in Chinese)
- [4] 苏杭,赵纯龙,张钊溶,等. 基于三种不同微腔状态的 F-P 干涉型高灵敏度温度传感器[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 0906007.
SU H, ZHAO C L, ZHANG Z R, *et al.* High sensitivity fabry-Pérot interferometric temperature sensor based on three different microcavity states [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0906007. (in Chinese)
- [5] 杨泓铭,饶春芳,吴锴,等. 基于光纤布拉格光栅的压力蒸汽灭菌器气体质量监测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(3): 264-273.
YANG H M, RAO C F, WU K, *et al.* Gas quality monitoring for sterilizer based on fiber Bragg grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(3): 264-273. (in Chinese)
- [6] 吴根柱,林春婷,卢俊城,等. 七芯光子晶体光纤温度传感器[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 951-957.
WU G Z, LIN C T, LU J C, *et al.* Seven-core photonic crystal fiber temperature sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 951-957. (in Chinese)
- [7] 薛兆康,国旗,刘善仁,等. 油气井下光纤光栅温度压力传感器[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1224-1230.
XUE Z K, GUO Q, LIU S R, *et al.* Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2021, 14(5): 1224-1230. (in Chinese)
- [8] XIE L Q, SUN B, CHEN M M, *et al.* Sensitivity enhanced temperature sensor with serial tapered two-mode fibers based on the Vernier effect[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32447.
- [9] ZHANG J, LIAO H, LU P, *et al.* Ultrasensitive temperature sensor with cascaded fiber optic Fabry-Perot interferometers based on vernier effect [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1-11.
- [10] GAO H, HU H, ZHAO Y, *et al.* Highly-sensitive optical fiber temperature sensors based on PD-MS/silica hybrid fiber structures [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 284: 22-27.
- [11] LI J W, ZHANG M, WAN M G, *et al.* Ultrasensitive refractive index sensor based on enhanced Vernier effect through cascaded fiber core-offset pairs [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4145-4155.
- [12] ROBALINHO P M R, GOMES A D, FRAZÃO O. High enhancement strain sensor based on vernier effect using 2-fiber loop mirrors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(18): 1139-1142.
- [13] 郭云,陈圣林,王平,等. 基于游标效应的温度不敏感光纤拉力传感器[J]. 光子学报, 2022, 51(12): 1206003.
GUO Y, CHEN S L, WANG P, *et al.* Temperature-insensitive optical fiber tension sensor based on vernier effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(12): 1206003. (in Chinese)
- [14] PAN R, YANG W L, LI L J, *et al.* A high-sensitive fiber-optic fabry-perot sensor with parallel polymer-air cavities based on vernier effect for simultaneous measurement of pressure and temperature [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(19): 21577-21585.
- [15] SU H, GAO L, ZHANG Z, *et al.* Optical fiber

- temperature sensor with Vernier effect formed by Mach-Zehnder interferometer cascaded Sagnac interferometer based on Hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2022, 52: 101085.
- [17] LANG C P, LIU Y, LIAO Y Y, *et al.* Ultra-sensitive fiber-optic temperature sensor consisting of cascaded liquid-air cavities based on vernier effect [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5286-5291.
- [18] LUO W, CAO Z, ZHANG G, *et al.* A highly sensitive optical fiber temperature sensor based on the enhanced vernier effect[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 67: 102702.
- [19] ZHU X P, JIANG C, CHEN H L, *et al.* Highly sensitive gas pressure sensor based on the enhanced Vernier effect through a cascaded Fabry-Perot and Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 34956.
- [20] MU X G, GAO J L, YANG Y Q, *et al.* Parallel polydimethylsiloxane-cavity fabry-perot interferometric temperature sensor based on enhanced vernier effect[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(2): 1333-1337.
- [21] GAO H, ZHANG Y X, ZHANG W G, *et al.* High sensitivity optical fiber temperature sensor based on PDMS-filled with extended measuring range[J]. *Optik*, 2021, 248: 168181.
- [22] CHEN M, ZHAO Y, XIA F, *et al.* High sensitivity temperature sensor based on fiber air-microbubble Fabry-Perot interferometer with PDMS-filled hollow-core fiber [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 275: 60-66.
- [23] 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 F-P cavity[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33290.
- [24] ZHANG W, WU X, ZUO C, *et al.* Highly sensitive temperature and strain sensor based on fiber Sagnac interferometer with Vernier effect[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127543.
- [25] 周豫, 周雪芳, 樊冰, 等. 基于 Vernier 效应的光纤温度传感特性研究[J]. *光电子·激光*, 2020, 31(4): 345-350.
- ZHOU Y, ZHOU X F, FAN B, *et al.* Research of fiber temperature sensing characteristics based on vernier effect [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2020, 31(4): 345-350. (in Chinese)
- [26] DAI M L, CHEN Z M, ZHAO Y F, *et al.* Fiber optic temperature sensor with online controllable sensitivity based on vernier effect [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(19): 21555-21563.
- [27] PAN R, LIU M, BIAN Y, *et al.* High-sensitive temperature sensor with parallel PDMS-filled FPIs based on dual Vernier effect[J]. *Optics Communications*, 2022, 518: 128284.

作者简介:



高佳乐(1998—),女,山东济宁人,硕士研究生,2020年于山东财经大学获得学士学位,主要从事光学传感与检测技术的研究。E-mail: gaojiale24@163.com

通讯作者:



杨玉强(1977—),男,山东德州人,博士,教授,博士生导师,2002年于东北师范大学物理学专业获学士学位,2004年和2009年于哈尔滨工业大学光学和物理电子学专业分别获得硕士和博士学位,主要从事光学传感与检测技术研究。E-mail: yuqianguy110@sina.com

通讯作者:



牟小光(1978—),男,山东德州人,硕士,讲师,2001年于广东海洋大学获学士学位,2009年于武汉理工大学获硕士学位,主要从事光纤传感与检测技术研究。E-mail: xd_gdou@sina.com