

# 高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器

黄炳森<sup>1</sup>, 高社成<sup>1\*</sup>, 黄新成<sup>1</sup>, 冯元华<sup>1</sup>, 朱淑芬<sup>2</sup>, 陈舜儿<sup>1</sup>, 刘伟平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>暨南大学信息科学技术学院, 广东 广州 510632;

<sup>2</sup>内蒙古医科大学附属医院, 内蒙古 呼和浩特 010110

**摘要** 提出一种复合结构应变传感器,该结构将高灵敏度光纤法布里-珀罗干涉仪(FPI)内置于光纤 Sagnac 干涉仪(FSI)中。利用 FPI 光谱与定标的 FSI 光谱叠加产生的游标效应实现了 FPI 应变传感器灵敏度大幅度提升。理论计算结果表明,复合结构传感器的灵敏度可以通过两套干涉谱的相对自由光谱区的差来调控。实验结果表明,复合结构传感器的灵敏度相对于单个 FPI 应变传感器提升了 19.7 倍,达到  $65.1 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ 。复合结构传感器在需要高灵敏度测量以及精确测量的场景中具有重要作用。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 游标效应; Sagnac 干涉仪; 法布里-珀罗干涉仪; 应变传感器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0606002

## High-Sensitivity Fiber Fabry-Pérot Interferometer Strain Sensor

Huang Bingsen<sup>1</sup>, Gao Shecheng<sup>1\*</sup>, Huang Xincheng<sup>1</sup>, Feng Yuanhua<sup>1</sup>, Zhu Shufen<sup>2</sup>,  
Chen Shuner<sup>1</sup>, Liu Weipin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

<sup>2</sup> The Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot, Inner Mongolia 010110, China

**Abstract** A composite structural strain sensor is proposed, which incorporates a high-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer (FPI) into the fiber Sagnac interferometer (FSI). The sensitivity of the FPI strain sensor is greatly improved by the vernier effect, which is caused by the superposition of the FPI and calibrated FSI spectra. The results of theoretical calculation show that, the sensitivity of the composite structure sensor can be regulated by the free spectral range difference between two sets of interference spectra. Further, the experiment results show that, the sensitivity of the composite structure sensor is increased 19.7 times compared with that of a single FPI strain sensor, reaching  $65.1 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ . The composite structure sensor plays an important role in scenarios requiring high sensitivity measurement and accurate measurement.

**Key words** fiber optics; fiber sensor; vernier effect; Sagnac interferometer; Fabry-Pérot interferometer; strain sensor

**OCIS codes** 060.2370; 060.2300; 060.2340; 060.2310

## 1 引 言

光纤应变传感器已被大量应用于路面、桥梁、大坝等建筑的健康监测中,有助于发现结构中的安全隐患,便于采取补救措施,有利于延长建筑物的使用寿命<sup>[1]</sup>。光纤法布里-珀罗干涉仪(FPI)由于具有结构简单、易于集成、体积小以及能在恶劣环境中工作等优良特性而得到广泛研究<sup>[2]</sup>。Duan 等<sup>[3]</sup>通过放电手段将两段单模光纤的端面制作成内凹陷型,然后将这两段光纤熔接到一起,由于中间形成的空

气腔,整个结构可以看成是一个 FPI,实现了  $4 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$  的灵敏度。这种方法需要对放电量进行较为精确的控制,并且制作出来的弧形端面形状具有随机性,不利于 FPI 反射镜面的形成,而且灵敏度相对较低。Zhou 等<sup>[4]</sup>通过二氧化碳激光器将光纤端面制成弧形,然后通过电弧放电的方法制作了 FPI,灵敏度高达  $56.69 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,这种方法虽然灵敏度相对较高,但是二氧化碳激光加工手段比较复杂,而且设备昂贵,使得这种方法的推广具有局限性。Liu 等<sup>[5]</sup>将一端塌陷的光子晶体光纤与单模光纤

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-09-08; 录用日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61875076, 61775085, 61705088, 61865014)、广东省科技计划项目(2017B010123005)

\* E-mail: gaosc825@163.com

进行熔接,形成的 FPI 的灵敏度为  $60.7 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,这种方法使用的光子晶体光纤的成本较高。上述几种方法有的易于操作,但是灵敏度较低,通常为几个皮米每微应变,有的虽然灵敏度较高,可以达到几十皮米每微应变,但是加工设备昂贵,不利于推广。因此,开发一种结构简单、易于推广、灵敏度高的光纤应变传感器在结构健康监测、精确测量等方面具有重要应用。

游标效应最初应用于游标卡尺和气压计中,用于提升测量的精确度,后来也被应用到光器件传感系统中,用于放大光谱共振峰的漂移,可提高光子器件灵敏度<sup>[6]</sup>。基于游标效应的传感器组合包括两个级联的 FPI<sup>[7]</sup>、两个级联的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[8]</sup>、两个级联的光纤 Sagnac 干涉仪(FSI)<sup>[9]</sup>,它们被分别应用于高灵敏度折射率传感以及高灵敏度温度传感等系统中,然而,这些组合都是由级联同一作用机制的干涉仪构成,这样很难满足参照单元(相当于定标的主尺)对外界环境不敏感而传感单元(相当于游标的游尺)对外界环境敏感的要求。另外,基于游标效应的应变测量方案鲜有报道,Zhang 等<sup>[10]</sup>虽然提出了一种基于游标效应的光纤应变传感器,但是器件尺寸较大,并且由于运用的是同一种干涉机制的级联,实际应用中很难在传感臂伸长时保持参照臂不动。

本文在 FSI 中引入 FPI 机制,使这两种作用机制的输出信号从同一个端口输出,其中 FSI 光谱稳定易控,FPI 光谱易受应力影响;利用 FSI 自由光谱范围的易控性和相对稳定性,为 FPI 提供一个基于游标效应测量的“定标主尺”,使 FPI 光谱在应力作用下的响应特性得到放大。精确设计 FSI 中保偏光纤的长度以及 FPI 的腔长,可以使 FSI 形成的干涉光谱和 FPI 形成的光谱的自由光谱区(FSR)相近但不相同,从而在输出谱中形成具有周期性的大包络,包络的自由光谱区由 FSI 中保偏光纤的长度和 FPI 的腔长决定。对 FPI 施加轴向应力,FPI 的自由光谱区会发生改变,由于游标效应的存在,FPI 共振峰的变化将会导致组合器件输出谱的共振峰的包络出现一个巨大的波长漂移,从而实现探测灵敏度成倍的提高。本文应变灵敏度从  $3.3 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ (单独的 FPI)提升到  $65.1 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,放大倍数为 19.7。

## 2 基本原理

基于 FSI 和 FPI 组合的应变传感器的示意图如图 1 所示。宽带光源输出的光谱带宽为  $600 \sim$

$2400 \text{ nm}$ 。OSA 为光谱分析仪,可监测  $700 \sim 1750 \text{ nm}$ 波段,分辨率为  $0.02 \text{ nm}$ 。3 dB 耦合器将光束能量以 50:50 比例平均分配到两个端口,将 3 dB 耦合器的两个端口依次与保偏光纤和空心光纤熔接,形成一个闭环,从而形成一个 FSI 结构。在 Sagnac 干涉仪回路中接入一个偏振控制器,从而保证入射光的偏振态一致。

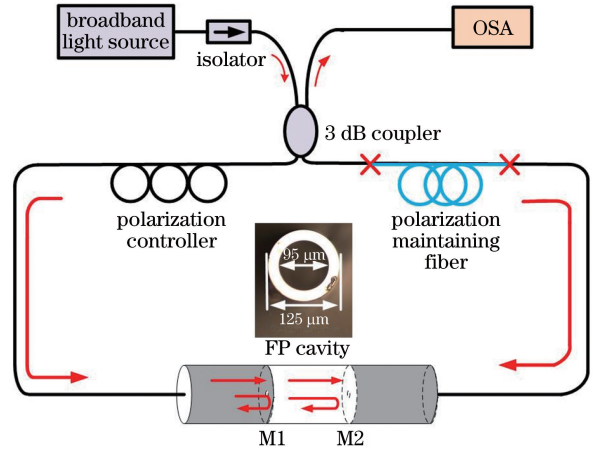


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

设反射面 M1 和 M2 的反射率分别为  $R_1$  和  $R_2$ , M1 引入的传输损耗为  $\alpha$ ,则从左侧单模光纤(SMF)入射的光经过两个反射面 M1 和 M2 后再次回到 SMF 中的光强<sup>[11]</sup>可表示为

$$I_{\text{FP}} = R_1^2 + (1 - \alpha)^2 (1 - R_1)^2 R_2^2 + 2(1 - \alpha)(1 - R_1)R_1 R_2 \cos(2\phi), \quad (1)$$

式中:光在谐振腔内传输引起的相位变化  $\phi = \frac{2\pi n L_1}{\lambda}$ ,  $L_1$  为 FPI 的腔长,FP 腔中的空气的有效折射率  $n=1$ ,  $\lambda$  为真空中的波长。因此,FPI 的干涉峰 dip 点出现在  $\lambda_m = \frac{2nL_1}{m}$  处,  $\lambda_m$  为第  $m$  级干涉峰对应的波长。当 FPI 受到外界应力扰动时,波长漂移量<sup>[12]</sup>可以表示为

$$\Delta\lambda = \left( \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L_1} \right) \lambda_m = \left( \frac{\Delta n}{n} + \epsilon_z \right) \lambda_m, \quad (2)$$

式中: $\Delta n$  为应力引起的腔内空气有效折射率的变化量,即腔内空气的弹光系数; $\Delta L$  为应力引起的 FPI 腔长的变化量;轴向应变  $\epsilon_z = \frac{\Delta L}{L_1}$ 。对 FPI 来说,其腔内空气的弹光系数可以忽略不计,即  $\Delta n = 0$ ,则  $\Delta\lambda = \frac{\Delta L}{L_1} \times \lambda_m = \epsilon_z \lambda_m$ 。对于  $1550 \text{ nm}$  波长,FPI 应变灵敏度约为  $1.55 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,这个量级符合众多

FPI 应变传感器灵敏度不高的特性。

FPI 的 FSR<sup>[13]</sup> 为

$$F_{\text{FPI}} = \lambda^2 / 2nL_1. \quad (3)$$

光纤 Sagnac 环的光谱是一个与波长相关的正弦曲线<sup>[14]</sup>, 可以表示为

$$I_{\text{FSI}} = (1 - \cos \varphi) / 2, \quad (4)$$

式中: 保偏光纤中两束光的相位差  $\varphi = 2\pi BL / \lambda$ ,  $B$  为保偏光纤的双折射系数, 实验中  $B = 3.8 \times 10^{-4}$ ,  $L$  为保偏光纤的长度。当  $\varphi = 2\pi m'$  ( $m'$  是整数) 时, 透射光谱在  $\lambda$  处出现极大值。因此, Sagnac 环的 FSR<sup>[15]</sup> 可以表示为

$$F_{\text{FSI}} = \lambda^2 / BL. \quad (5)$$

两套光谱叠加形成游标效应。FSI 在光路中会

形成一套光谱, FSR 大小为  $\Delta F_{\text{FSI}}$ , FPI 在光路中也会形成一套光谱, FSR 大小为  $\Delta F_{\text{FPI}}$ 。由于 FSI 和 FPI 同时连接在一个光路中, 因此它们的 FSR 来自于同一个光源。假设  $\Delta F_{\text{FSI}}$  大于  $\Delta F_{\text{FPI}}$ , 当 FSI 光谱的第  $i$  级次的共振波长位置和 FPI 的第  $j$  级次的共振波长位置重合且幅值相同时, 就会在重合波长位置形成一个共同的共振波长极大(小)值。当 FSI 光谱的第  $(i+k)$  级次波长位置和 FPI 光谱的第  $(j+l)$  级次波长位置重合且幅值相反时, 在重合位置出现包络极小值, 如图 2 中虚线所示。由于  $\Delta F_{\text{FPI}}$  与  $\Delta F_{\text{FSI}}$  大小不同, 下一次重合极大值位置又会在第  $(i+o)$  级次和  $(j+p)$  级次出现, 以此循环, 最终在叠加谱上形成周期性的大包络, 如图 2 所示。

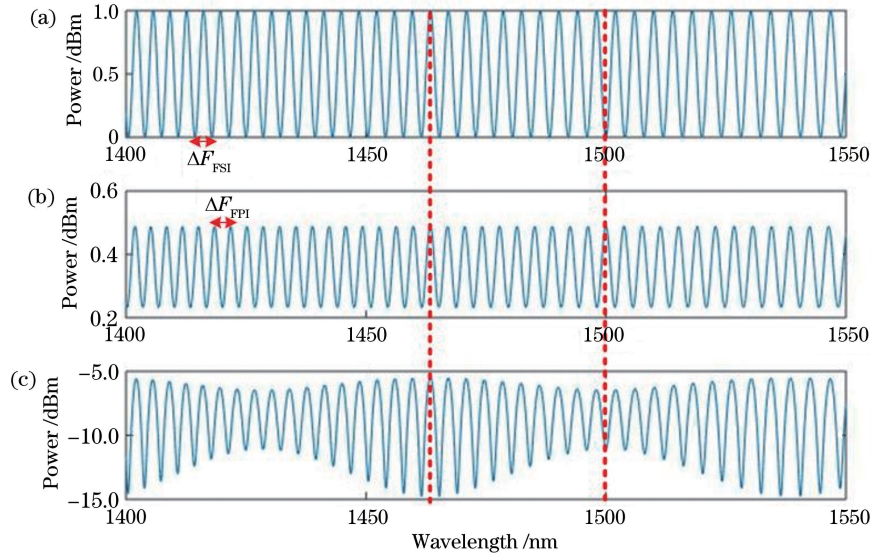


图 2 游标效应原理示意图。(a) FSI 光谱;(b) FPI 光谱;(c) 叠加光谱

Fig. 2 Schematic of vernier effect. (a) Spectrum of FSI; (b) spectrum of FPI; (c) spectrum of superposition

仿真计算单个 FSI 和单个 FPI 的输出光谱, 如图 3(a) 所示。仿真计算 FSI+FPI 组合的输出光谱, 如图 3(b) 所示, 这些峰值的 FSR<sup>[10]</sup> 表示为

$$F_{\text{envelop}} = \frac{F_{\text{FSI}} \cdot F_{\text{FPI}}}{|F_{\text{FSI}} - F_{\text{FPI}}|}. \quad (6)$$

如图 3(a) 所示, 仿真所得  $F_{\text{FSI}} = 3.8 \text{ nm}$ ,  $F_{\text{FPI}} = 3.6 \text{ nm}$ , 在波长 1462 nm 处, 最大峰值位置重叠且振幅相同。如图 3(b) 所示, 总的输出谱线是一个巨大的包络, 它的自由光谱区  $F_{\text{envelop}} = 71 \text{ nm}$ , 最大峰值位置为 1462 nm, 这与单独 FPI 和 FSI 的最大峰值位置处的波长一致。

在实验中, 通过设计保偏光纤的长度和 FPI 的腔长, 可以得出较为理想的 FSR。通过对 FPI 施加轴向应力, FPI 的腔长随着应力的增加而增大, 由 (3) 式可知, FPI 的 FSR 将发生改变, 波长产生漂

移, 这相当于游标卡尺中的游尺, 而保偏光纤的长度不变, 则  $F_{\text{FSI}}$  不变, 这就相当于游标卡尺中的主尺。因此在总的输出谱线上, 大包络的漂移相当于被放大了数倍, 这个倍数<sup>[10]</sup> 可以表示为

$$M = \frac{F_{\text{FSI}}}{|F_{\text{FPI}} - F_{\text{FSI}}|}. \quad (7)$$

因此在实际应用中, 根据需要也可以通过设计合适的腔长来实现放大倍数的自由调整。

游标效应的放大作用的仿真结果如图 4 所示, FPI 共振峰的漂移量设置为 0.5 nm, 则大包络的漂移量为 11 nm, 放大倍数为 22。这与 (7) 式计算的结果基本一致。

### 3 实验结果与分析

实验中使用的保偏光纤的长度为 1.5 m, 双折

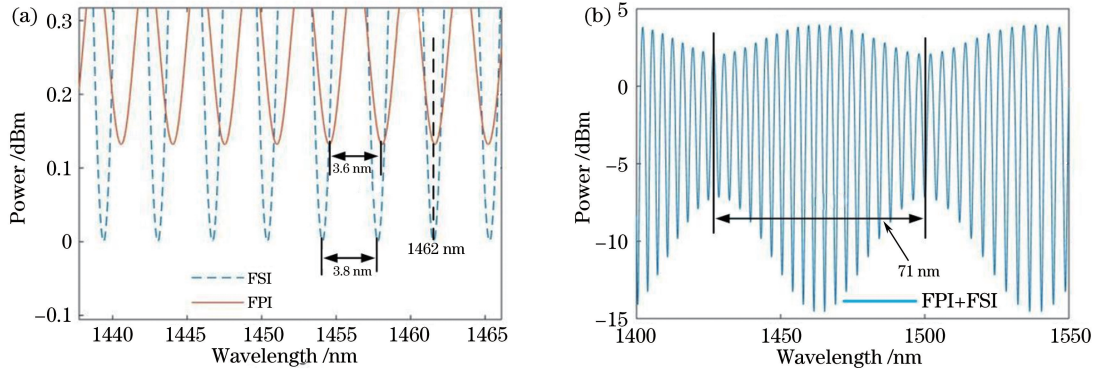


图 3 独立结构与复合结构传感器模拟的输出光谱图。(a)独立结构;(b)复合结构

Fig. 3 Simulated output spectra of single structure and composite structure sensors. (a) Single structure; (b) composite structure

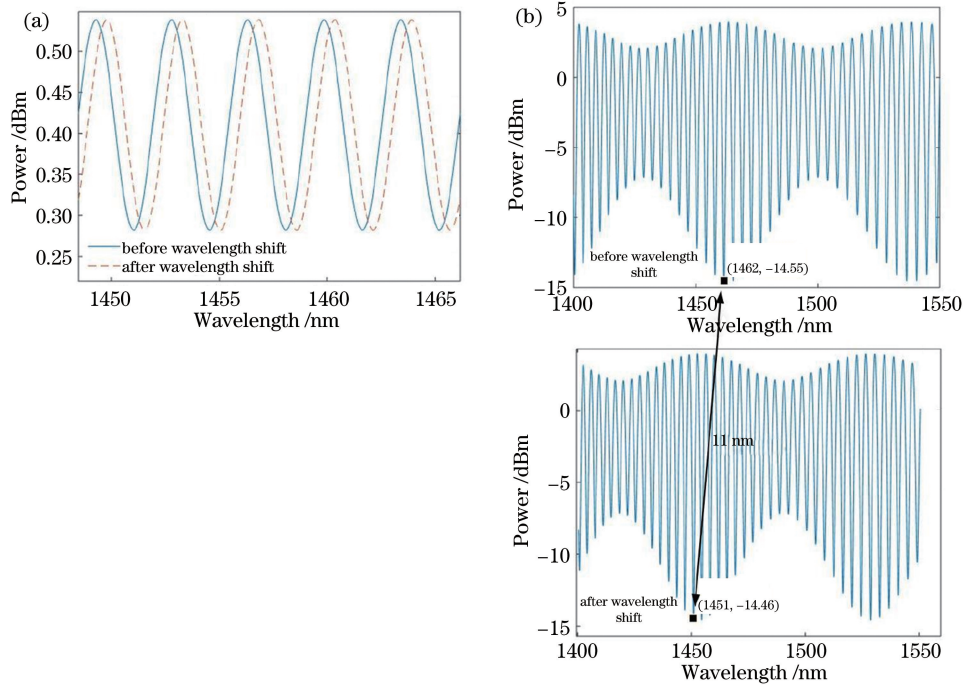


图 4 单独 FPI 和复合结构传感器的波长漂移。(a)单独 FPI 传感器;(b)复合结构传感器

Fig. 4 Wavelength shift of single FPI and composite structure sensors. (a) Single FPI sensor; (b) composite structure sensor

射系数  $B = 3.8 \times 10^{-4}$ 。FP 腔的制作方法如下。首先,将普通单模光纤与空心光纤(内径为  $95 \mu\text{m}$ ,外径为  $125 \mu\text{m}$ )的左端通过光纤熔接机进行熔接,通过调节熔接机的对准马达,使空芯光纤与普通单模光纤的中心位置对齐,减少高阶模式的激发,有利于保持最终反射光谱的整洁性。接下来将熔接好的结构固定在光纤切割刀上,另一端的尾纤部分固定在微位移平台(精度为  $10 \mu\text{m}$ )上,通过移动微位移平台,切割一定长度的空芯光纤。切割完成后,将空芯光纤的右端放入熔接机中,进行 FP 腔右端的熔接操作。熔接参数保持不变,通过调节对准马达使空芯光纤与单模光纤对准,再放电熔接,熔接的时候要

控制放电量与放电时间,防止空心光纤的空气腔坍塌,本实验中,放电强度为  $40 \text{ mA}$ ,放电时间为  $300 \text{ ms}$ 。由于空心光纤内部是空气填充,虽然二氧化硅-空气界面的反射率不足  $4\%$ ,但其中的光束在中间的干涉仍可视作法布里-珀罗干涉<sup>[16-17]</sup>,则 FP 腔可视为一个 FPI。在光纤自然绷直的状态下,先使信号光分别经过单个 FPI 和单个 FSI,得到的光谱如图 5(a)所示,然后使信号光经过组合结构传感器(FPI+FSI),得到的光谱如图 5(b)所示。测得  $F_{\text{FPI}}$  和  $F_{\text{FSI}}$  分别为  $3.21 \text{ nm}$  和  $3.43 \text{ nm}$ ,大包络的自由光谱区  $F_{\text{envelop}}$  为  $46.7 \text{ nm}$ ,与(6)式计算的自由光谱区( $50 \text{ nm}$ )基本吻合,误差主要来自于读取光谱误差。

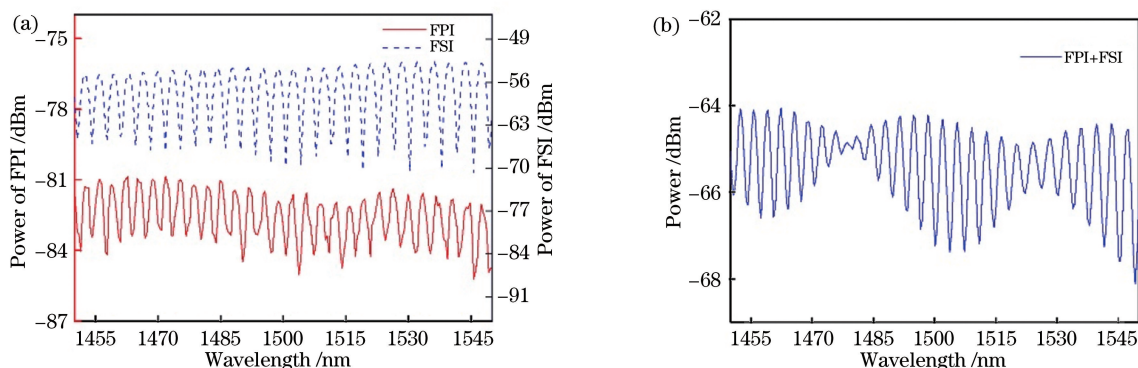


图 5 独立结构和复合结构传感器的输出光谱图。(a)独立结构;(b)复合结构

Fig. 5 Output spectra of single structure and composite structure sensors. (a) Single structure; (b) composite structure

分别对单个 FPI 的应变灵敏度和 FPI+FSI 组合的应变灵敏度进行测试。将 FPI 固定于两个微位移平台上,平台间的距离为 36 cm,调节其中一个微位移平台,使平台向外移动,每次位移为  $30 \mu\text{m}$ , FPI 产生的应变量为  $83 \mu\epsilon$ ,分别记录位移平台每一次移动后的光谱。图 6(a)为单个 FPI 受应变后的光谱漂移情况,图 6(b)为 FPI+FSI 组合受应变后的光谱漂移情况。由图 6(a)、(b)可以看出,FSI+FPI 组合结构的包络波长漂移量(21 nm)大大高于单独的 FPI 波长漂移量(0.89 nm),灵敏度得

到了显著提高。两种结构的应变灵敏度的线性拟合如图 6(c)所示,测得复合结构传感器的灵敏度为  $65.1 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,线性度  $R^2$  为 0.995,单个 FPI 结构的灵敏度为  $3.3 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,线性度  $R^2$  为 0.988,则实验上灵敏度放大的倍数为 19.7,这与(7)式计算结果(15.6)基本吻合。

设计两个结构的 FSR,使它们的差值更小,则可以得到更加灵敏的性能。此外,温度可能会给传感器带来串扰影响,可以通过追踪干涉光谱上不同的两个共振峰对温度和应力的不同响应系数,再通

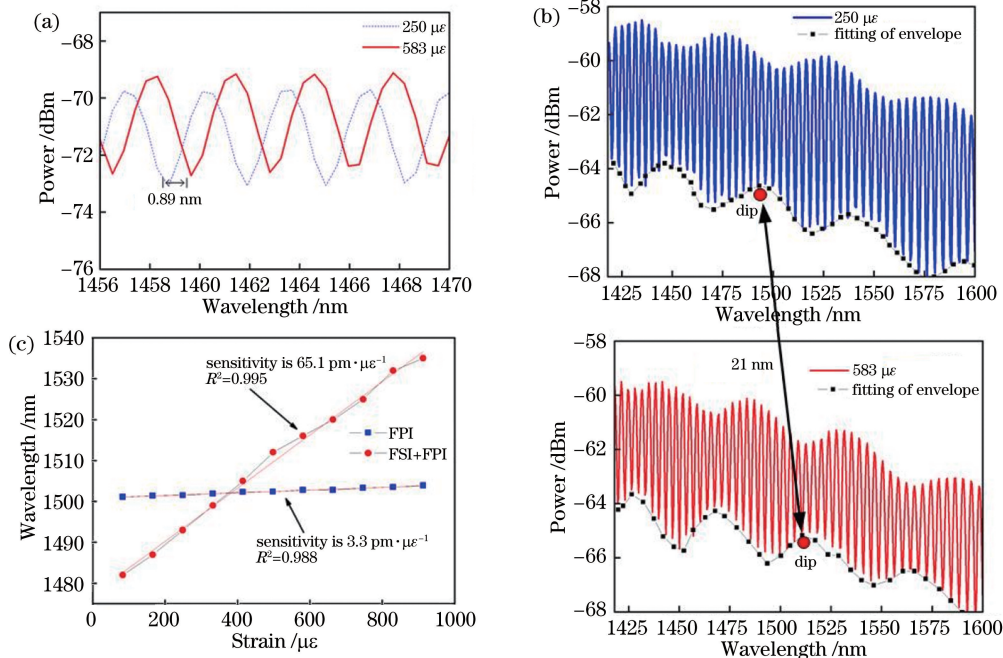


图 6 单独 FPI 传感器与复合结构传感器的共振波长漂移和灵敏度线性拟合。(a)单独 FPI 传感器的共振波长漂移情况;(b)复合结构传感器的共振波长漂移情况;(c)灵敏度的线性拟合

Fig. 6 Resonance wavelength shift of single FPI sensor and composite sensor and linear fitting of sensitivity. (a) Resonance wavelength shift of single FPI sensor; (b) resonance wavelength shift of composite structure sensor; (c) linear fitting of sensitivity

过矩阵运算的方法,可以在一定程度上降低温度的串扰<sup>[18]</sup>。

## 4 结 论

提出一种基于游标效应的高灵敏度光纤 FPI 应变传感器,所提出的传感器将光纤 FPI 内置于 FSI,通过合理设计 FPI 和 FSI 的长度,使它们的 FSR 相近但不相同,从而在输出光谱中形成游标效应。利用游标效应,复合结构应变传感器的灵敏度比单个 FPI 传感器的灵敏度增加了 19.7 倍,达到  $65.1 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ 。这个结果大大高于 Zhou 等<sup>[4]</sup>报道的  $56.69 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ , Liu 等<sup>[5]</sup>报道的  $60.7 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ 。在数值模拟和实验上对所提方案进行了深入研究,模拟结果和实验结果吻合较好,从而证明了所提方案的有效性和可靠性。在实际应用中,还可以通过进一步设计使 FPI 和 FSI 结构的 FSR 差值更小,从而实现更高的器件灵敏度。另外,复合结构传感器结构简单、制作方便,在应力检测和振动测量中具有广泛的应用价值,并为在极端复杂环境下<sup>[19]</sup>提高 FPI 传感器灵敏度提供了有价值的参考。例如将薄膜辅助的开腔 FPI 作为游标效应中的传感单元,并引入 FSI 机制作为游标效应的参照单元,从而将所提方案应用到海洋等极端复杂环境中。

## 参 考 文 献

- [1] Pang X R, Wang D P. Oblique crack monitoring of concrete beam with macro FBG strain sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120603.  
庞香润, 王大鹏. FBG 宏应变传感器的混凝土梁斜裂缝监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120603.
- [2] Chen Q Q, Tang Y, Wang K N, et al. Characteristic analysis of correlation interference signals in optical wedge type fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110603.  
陈青青, 唐瑛, 王可宁, 等. 光楔式光纤法布里-珀罗传感器相关干涉信号特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110603.
- [3] Duan D W, Rao Y J, Hou Y S, et al. Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(8): 1033-1036.
- [4] Zhou K, Ai M Z, Qian Z H, et al. High-sensitivity strain sensor with an in-fiber air-bubble Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(18): 181901.
- [5] Liu H F, Liu B. High-sensitivity Fabry-Pérot strain sensor based on fusion splicing photonic crystal fiber and single mode fiber [C]//2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), July 18-20, 2018, Budapest, Hungary. New York: IEEE, 2018: 18161263.
- [6] Jin L, Li M Y, He J J. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with Vernier effect [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 156-159.
- [7] Quan M R, Tian J J, Yao Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and Vernier effect [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4891-4894.
- [8] la Notte M, Passaro V M N. Ultra high sensitivity chemical photonic sensing by Mach-Zehnder interferometer enhanced Vernier-effect [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 176: 994-1007.
- [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] Zhang P, Tang M, Gao F, et al. Cascaded fiber-optic Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for highly sensitive measurement of axial strain and magnetic field [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19581-19588.
- [11] 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): 33290-33296.
- [12] Wu C, Fu H Y, Qureshi K K, et al. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 412-414.
- [13] Jiang Y J, Yang D X, Yuan Y, et al. Strain and high-temperature discrimination using a type II fiber Bragg grating and a miniature fiber Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6341-6345.
- [14] 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.
- [15] Zhou D P, Wei L, Liu W K, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature based on a fiber Bragg grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror [J]. *Optics*

- Communications, 2008, 281(18): 4640-4643.
- [16] Chen L H, Li T, Chan C C, et al. Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 169: 167-172.
- [17] Xu F, Ren D X, Shi X L, et al. High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 133-135.
- [18] Geng T, He J, Yang W L, et al. Modal interferometer using three-core fiber for simultaneous measurement strain and temperature [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(4): 6803908.
- [19] Zhang W H, Jiang J F, Wang S, et al. Fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206001.
- 张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206001.