

## 激光与光电子学进展

## 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

杨翔文, 罗彬彬\*, 石胜辉, 邹雪, 吴德操, 陈荟吉, 李玉洁, 古洪, 赵明富

重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054

**摘要** 提出一种基于夹层多模光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)与虚拟游标效应结合的高灵敏度温度传感器,进行了理论分析和实验验证。该光纤MZI是通过在两段1 mm长的阶跃型多模光纤之间拼接一段20 mm的渐变多模光纤制成,夹层多模光纤MZI作为游标效应的传感干涉仪,利用信号处理对该光纤MZI的干涉光谱进行变频得到参考干涉仪光谱,通过叠加传感干涉仪和参考干涉仪的波形实现虚拟游标光谱。实验结果表明,在40~100 °C温度范围内,该传感系统的温度灵敏度为3.884 nm/°C,与单个夹层多模光纤MZI相比,灵敏度提高了37.346倍。与传统的光纤游标传感器相比,所提出的虚拟游标夹层多模光纤温度传感器具有灵敏度极高、尺寸紧凑、制作简单、成本低、结果更可靠等优点。

**关键词** 光纤光学; 夹层多模光纤; 马赫-曾德尔干涉仪; 温度传感; 虚拟游标效应

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222482

## High-Sensitivity Temperature Sensor Based on Sandwich Multimode Fiber Mach-Zehnder Interferometer with Virtual Vernier Effect

Yang Xiangwen, Luo Binbin\*, Shi Shenghui, Zou Xue, Wu Decao, Chen Huiji, Li Yujie, Gu Hong, Zhao Mingfu

Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

**Abstract** In this study, a high-sensitivity temperature sensor based on the sandwich multimode fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) with the virtual vernier effect is developed, and theoretical analysis and experimental verification are performed. The MZI was made by splicing a graded-index multimode fiber with a length of 20 mm between two pieces of stepped-index multimode fibers with lengths of 1 mm. The sandwich multimode fiber MZI was used as the sensor interferometer to evaluate the vernier effect, and the reference interferometer spectrum was obtained via frequency conversion of the interference spectrum of the fiber MZI through signal processing. The virtual vernier spectrum was obtained by superimposing waveforms of the sensing and reference interferometers. The experimental results show that the temperature sensitivity of the sensor system is 3.884 nm/°C within the temperature range of 40–100 °C, which is 37.346 times higher than that of a single-sandwich multimode fiber MZI. Compared with the traditional fiber sensors based on the vernier effect, the proposed sandwich multimode fiber MZI temperature sensor based on the virtual vernier effect has exceptionally high sensitivity, compact size, simple fabrication, low cost, and more reliable results.

**Key words** fiber optics; sandwich multimode fiber; Mach-Zehnder interferometer; temperature sensing; virtual vernier effect

## 1 引言

光纤传感器具有耐腐蚀、抗电磁干扰、体积小等优点,过去几十年,各种温度、曲率、应变、生化光纤传感

器都得到大量发展,其中温度传感是其最重要的应用之一。迄今报道了多种不同类型的光纤温度传感器,包括:Sagnac环<sup>[1]</sup>、锥形光纤<sup>[2]</sup>、光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[3]</sup>等。2013年,Wo等<sup>[4]</sup>提出了一种基于多模-

收稿日期: 2022-08-06; 修回日期: 2022-09-07; 录用日期: 2022-09-19; 网络首发日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(61875026)、重庆市英才青年拔尖人才计划(cstc2021ycjh-bgzxm0128)、重庆市英才创新领军人才计划(cstc2021ycjh-bgzxm0287)、重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K202201106)、重庆市研究生科研创新项目(CYS21450)

通信作者: \*luobinbin@cqut.edu.cn

单模-多模(MSM)光纤结构的温度传感器,在 25~70 °C 温度范围内,其温度灵敏度为 50.65 pm/°C。刘玉等<sup>[5]</sup>将一段长为 1.8 m 的渐变多模光纤(GIMMF)拼接在两段单模光纤(SMF)之间,构成 SMF-GIMMF-SMF 光纤结构,其温度灵敏度为 58.5 pm/°C。吴强等<sup>[6]</sup>利用阶跃型多模光纤(SIMMF)制作了一种弯曲单模-多模-单模(SMS)光纤结构,其温度灵敏度为 11.6 pm/°C。Yadav 等<sup>[7]</sup>提出了一种用于温度传感的单模锥形光纤,当其腰区直径为 10 μm 时,其温度灵敏度达到了 34.06 pm/°C。

为进一步提高光纤传感器的灵敏度,光学游标效应被广泛采用<sup>[8]</sup>。游标效应是通过级联或并联两个自由光谱范围(FSR)相近的干涉仪来实现的,其中一个作为传感单元,另一个作为参考单元,二者干涉条纹较均匀时,就能得到具有包络的整体光谱,当外界参数发生变化时,游标包络的波长漂移远高于精细谱的波长漂移<sup>[9]</sup>。例如,级联微纳光纤的温度传感<sup>[10]</sup>、Sagnac 环<sup>[11]</sup>、级联法布里-珀罗的磁场传感器<sup>[12]</sup>。然而大部分光纤 MZI 的干涉谱都是多个光纤模式之间的干涉,不像上述结构的干涉条纹那样具有良好的规则性,这也是游标效应较少与 MZI 相结合提升灵敏度的原因。此外,虽然基于游标效应的光纤传感系统能够大幅度地提高灵敏度,但实际制作过程中,制作出两个光谱满

足周期性、对比度较高、FSR 较接近的干涉仪难度较大;同时,实际传感时,参考单元需要远离传感区域,放置在稳定的环境中,防止外界环境对其光谱产生影响最终破坏游标光谱的形成,然而实际应用中参考单元不可避免地会受到外界的影响,导致各种外界因素带来的测量误差。

本文设计了一种由一段 GIMMF 夹在两个很短的 SIMMF 之间制作而成的新型光纤 MZI 温度传感器,分析了干涉长度对传感器透射谱的影响,并根据结果设定光纤 MZI 温度传感器的结构参数,然后研究了其温度传感性能。进一步,通过带通滤波器提取实验光谱的主频分量,并与利用信号处理对实验光谱进行变频处理后得到的参考光谱进行叠加形成虚拟游标包络,以提高传感器灵敏度。与传统基于游标效应的光纤传感相比,该方法仅使用一个干涉仪就可以进行温度灵敏度放大,简化了传感系统;同时灵敏度放大倍数可调,另外,人为提供的参考光谱不受外界影响,温度传感结果更准确。

## 2 传感器原理

### 2.1 夹层多模光纤 MZI 结构及温度传感原理

所提出的传感器结构如图 1(a)所示,在两个约 1 mm 长的 SIMMF 之间拼接一段长为  $L$  的 GIMMF,

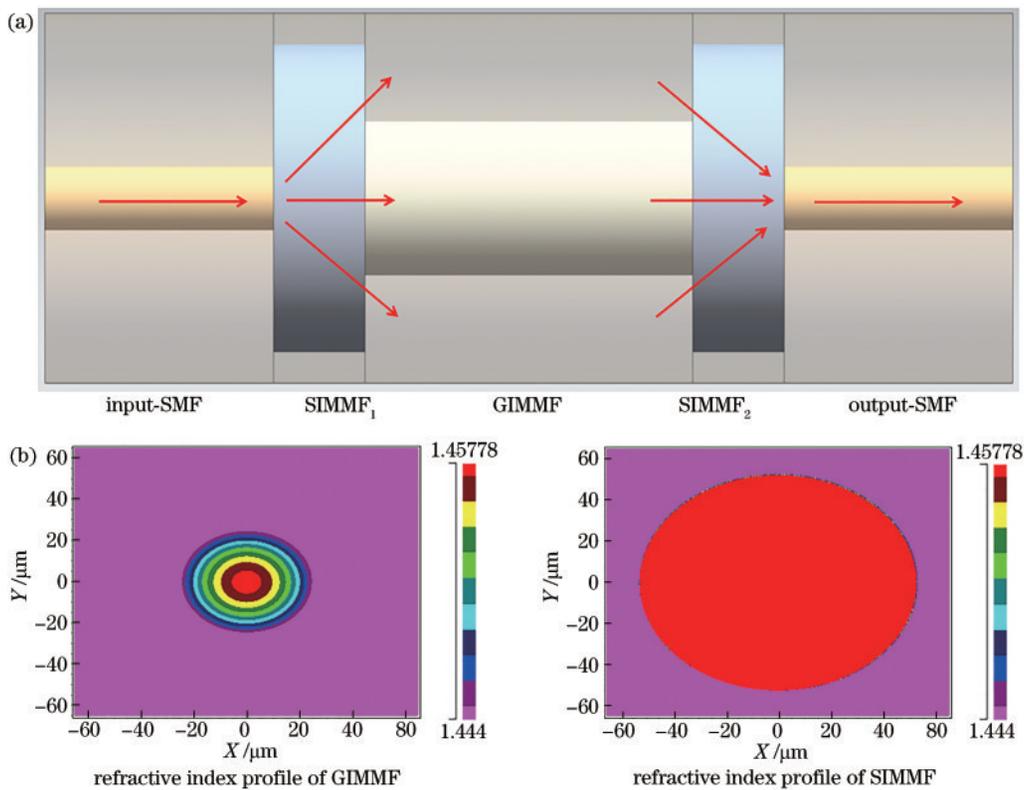


图 1 夹层多模光纤 MZI 的组成。(a) SIMMF-GIMMF-SIMMF 结构示意图;(b) GIMMF 和 SIMMF 的折射率剖面

Fig. 1 Composition of sandwich multimode fiber MZI. (a) Structure diagram of SIMMF-GIMMF-SIMMF; (b) refractive index profiles of GIMMF and SIMMF

再将 SIMMF 分别与标准 SMF 熔接。SMF 的芯径为  $8.3\ \mu\text{m}$ , SIMMF 的芯径为  $105\ \mu\text{m}$ , GIMMF 的芯径为  $50\ \mu\text{m}$ , 它们的包层直径均为  $125\ \mu\text{m}$ 。

多模光纤的折射率分布可表示为

$$n_r = n_0 \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n_0}\right)^2 \left(\frac{r}{a}\right)^q}; r \leq a, \quad (1)$$

$$n_r = n_{cl}; r \geq a$$

式中:  $n_0$  表示纤芯轴的折射率;  $NA$  为光纤的数值孔径值;  $n_{cl}$  表示光纤包层的折射率;  $a$  为纤芯半径;  $r$  表示光纤横截面上的任一点到纤芯正中心的距离;  $q$  表示折射率衰减指数, 对于 SIMMF,  $q = \infty$ , 本文所用的 GIMMF,  $q = 2$ 。SIMMF 和 GIMMF 的剖面折射率分

布如图 1(b) 所示。SIMMF-GIMMF-SIMMF 结构的导光机理如图 1(a) 所示, 当光通过引入 SMF 入射到 SIMMF<sub>1</sub> 时, 由于模场失配, 光会分离经两条路径传播, 一部分功率会耦合到 GIMMF 的包层模式, 一部分在 GIMMF 纤芯中传输, 然后传输到 SIMMF<sub>2</sub> 拼接点时, 部分 GIMMF 的包层模将再次耦合到 SIMMF<sub>2</sub> 的导模, 并与 GIMMF 的纤芯模一起耦合到引出单模光纤的基模。使用 Rsoft 软件模拟光在 SIMMF-GIMMF-SIMMF 结构中的传播, 仿真中多模光纤的包层折射率、SIMMF 纤芯、GIMMF 纤芯的折射率分别设置为  $1.444$ 、 $1.4578$ 、 $1.4578\sqrt{1-0.0188(r/25)^2}$ , 结果如图 2(a) 所示; 芯径为  $50\ \mu\text{m}$  的 GIMMF 纤芯内可以支持  $LP_{01} \sim LP_{05}$  模式传输<sup>[13]</sup>, 其模场分布如图 2(b) 所示。

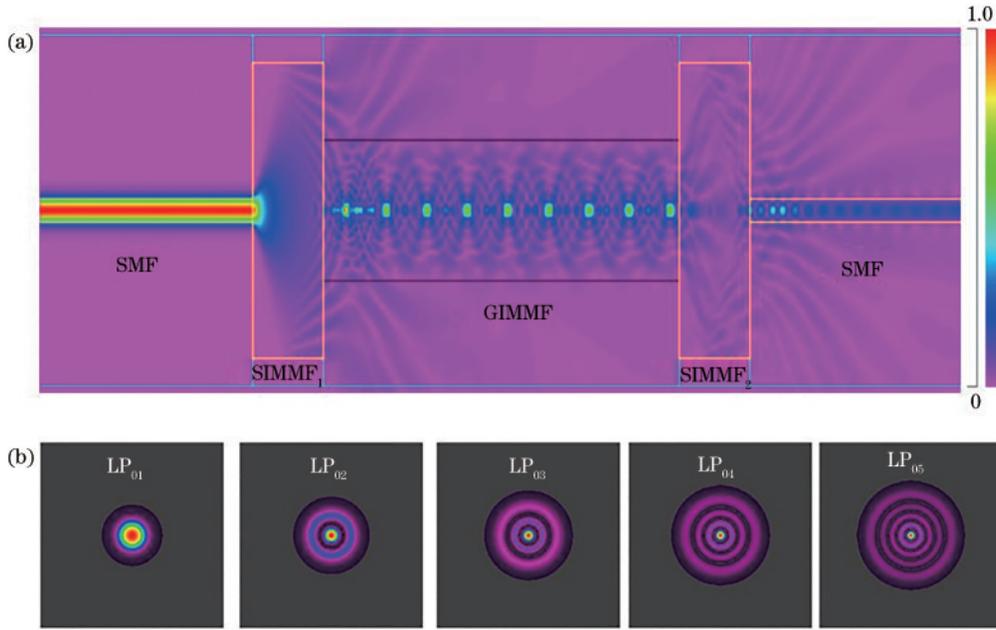


图 2 SIMMF-GIMMF-SIMMF 导光机理的仿真结果。(a) 夹层多模光纤 MZI 中光传输的模拟结果; (b) GIMMF 纤芯模的电磁场分布图

Fig. 2 Simulation results of light conduction mechanism of SIMMF-GIMMF-SIMMF. (a) Simulation results of optical transmission in sandwich multimode fiber MZI; (b) electromagnetic field distributions of core modes of GIMMF

该 MZI 的干涉图样可以简单地理解为 GIMMF 纤芯模和包层模发生干涉形成的。实际上, GIMMF 的不同芯模之间、不同包层模之间也可能存在干涉效应, 但它们的 FSR 很大, 在有限的光谱范围内只起到调制主干干涉图样的作用。因此 SIMMF-GIMMF-SIMMF 结构的传输功率可以表示为

$$I_s = I_{clad} + I_{core} + 2\sqrt{I_{clad}I_{core}} \cos(2\pi L\Delta n_{eff}/\lambda), \quad (2)$$

式中:  $I_s$  表示输出光强;  $I_{core}$  和  $I_{clad}$  分别表示 GIMMF 纤芯模式和包层模式的光强;  $\Delta n_{eff}$  表示 GIMMF 纤芯模和包层模的有效折射率差;  $L$  为 GIMMF 的长度;  $\lambda$  为工作波长。当环境温度波动时, 由于热光效应和热膨胀效应, GIMMF 的折射率和长度都会随之变化, 此时, MZI 的峰值波长可以表示为

$$\lambda_{dip} = \frac{2\Delta n_{eff}L}{2m+1} = \frac{2(\Delta n_{eff}^0 + \beta\Delta T)(L_0 + \alpha\Delta T)}{2m+1}, \quad (3)$$

式中:  $\beta$  表示 GIMMF 纤芯和包层的热光系数之差;  $\Delta n_{eff}^0$  为初始温度下纤芯模和包层模的有效折射率差;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $m$  是干涉条纹的阶数;  $L_0$  为初始温度下 GIMMF 的长度。可见, 干涉波长与温度的关系取决于  $2L_0\beta/(2m+1)$ , 是一个正数。因此, 随着温度的升高干涉峰会发生红移。

## 2.2 虚拟游标效应原理

本文使用虚拟游标效应方法, 是利用信号处理辅助单个 MZI 形成游标效应, 该方法的优势在于只需要制作一个干涉仪作为传感臂, 参考臂的光谱是对传感臂的干涉光谱进行空间频率转换得到的<sup>[14]</sup>。

设调制函数为

$$I_M = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} L_M\right), \quad (4)$$

用  $I_M$  函数调制传感臂的干涉谱  $I_s$ :

$$I_M \times I_s = (I_{\text{clad}} + I_{\text{core}}) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} L_M\right) + \sqrt{I_{\text{clad}} I_{\text{core}}} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_{\text{eff}} L - L_M)\right] + \sqrt{I_{\text{clad}} I_{\text{core}}} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_{\text{eff}} L + L_M)\right], \quad (5)$$

选择第二项作为干涉仪参考臂光谱,即

$$I_r = \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_{\text{eff}} L - L_M)\right]. \quad (6)$$

然后将测量的传感干涉仪光谱  $I_s$  乘以所构造的参考臂光谱  $I_r$ , 可得

$$I_s \times I_r = (I_{\text{clad}} + I_{\text{core}}) \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_{\text{eff}} L - L_M)\right] + \sqrt{I_{\text{clad}} I_{\text{core}}} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} L_M\right] + \sqrt{I_{\text{clad}} I_{\text{core}}} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_{\text{eff}} L + \Delta n_{\text{eff}} L - L_M)\right], \quad (7)$$

式中: 第一项对应参考臂光谱; 第二项对应游标包络。因此传感臂、参考臂、包络对应的 FSR 分别为

$$F_1 \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L}, \quad (8)$$

$$F_2 \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L - L_M}, \quad (9)$$

$$F_{\text{envelope}} \approx \frac{\lambda^2}{L_M}. \quad (10)$$

同样, 与传感干涉仪的波长位移相比, 参考臂波形与传感臂干涉光谱相叠加得到的虚拟游标包络的波长位移被放大了  $M$  倍:

$$M = \frac{F_{\text{envelope}}}{F_1} = \frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{L_M}. \quad (11)$$

由于  $L_M$  可以任意选择, 理论上  $M$  可以非常大。但实际上,  $L_M$  受光源的有限波长范围限制, 存在一个最小值:

$$L_{M-\min} = \frac{\lambda^2}{R}, \quad (12)$$

式中:  $\lambda$  为工作波长;  $R$  为光源的最大波长范围。此时, 游标包络对应的放大倍数  $M$  最大, 在光源的最大波长范围内, 只有一个包络峰。

### 3 结果及讨论

#### 3.1 传感器的设计与制备

夹层多模光纤 MZI 的制作过程如图 3 所示。首先, 使用光纤切割刀将待熔接光纤的端面切平, 然后使用光纤熔接机将 SMF 与 SIMMF 熔接。接着, 将 SMF-SIMMF 固定在精密位移平台上并将熔接点与切割刀垂直对齐, 然后转动位移台的旋转控制器, 将 SMF-SIMMF 向外移动 1 mm 并切割光纤, 重复该过程两次后制作出两段一样的 SMF-SIMMF。随后, 将 GIMMF 与 SMF-SIMMF 熔接, 并以相同的方式精确控制 GIMMF 的长度。最后, 将 SIMMF-GIMMF 与另一个 SMF-SIMMF 熔接, 构成 SIMMF-GIMMF-SIMMF 结构。通过上述方法, 制作了几个不同 GIMMF 长度的传感器单元, 其干涉光谱如图 4(a) 所示, 由图 4(a) 可知, 随着 GIMMF 长度增大, 该传感器的 FSR 逐渐减小。对图 4(a) 中的光谱进行快速傅里叶变换 (FFT) 后得到的空间频谱图如图 4(b) 所示, 对于不同 GIMMF 长度的夹层多模光纤 MZI, 其频谱图中都存在一个主峰, 这对应 GIMMF 纤芯模和占主导的包层模式之间的干涉<sup>[15]</sup>。通过式 (11) 可知干涉仪的 FSR 越小, 在特定的 1250~1650 nm 光谱范围内, 游标包络灵敏度的最大放大倍数  $M_{\max}$  越大, 因此, 选取  $L_{\text{GIMMF}} = 20$  mm 的 SIMMF-GIMMF-SIMMF 传感器进行后续温度传感实验。

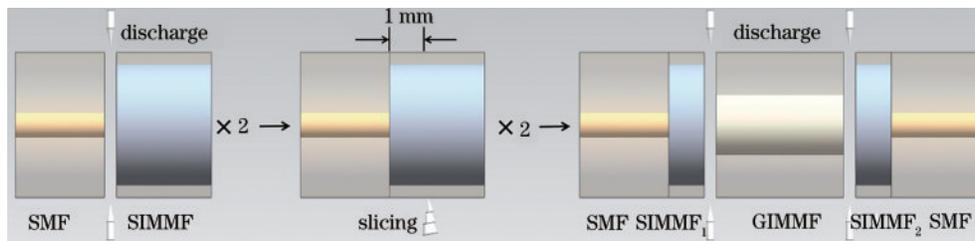


图 3 夹层多模光纤 MZI (SIMMF-GIMMF-SIMMF) 的制作流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of production process of sandwich multimode fiber MZI (SIMMF-GIMMF-SIMMF)

#### 3.2 基于虚拟游标的夹层多模光纤 MZI 温度传感系统

温度传感装置如图 5 所示, 宽带光源 (ASE, 1250~1650 nm) 发出的光通过 SIMMF-GIMMF-SIMMF 结构, 该结构由砒码和耐高温胶带固定在精度为  $\pm 0.1$  °C 的温度控制平台中间, 待温度控制器达到预设温度 10 min 后, 由分辨率为 0.02 nm 的光谱分

析仪 (OSA, AQ6370D, 600~1700 nm) 记录输出光谱, 最后将 OSA 记录的光谱与所设计的参考光谱进行叠加形成游标效应, 实现高灵敏度温度传感。

基于信号处理辅助的虚拟游标效应和夹层多模光纤 MZI 温度传感系统的搭建分为两个步骤。首先, 如图 6 所示, 按照 2.2 节中描述方法设计出参考光谱。图 6(a) 为  $L_{\text{GIMMF}} = 20$  mm 时夹层多模光纤 MZI 在

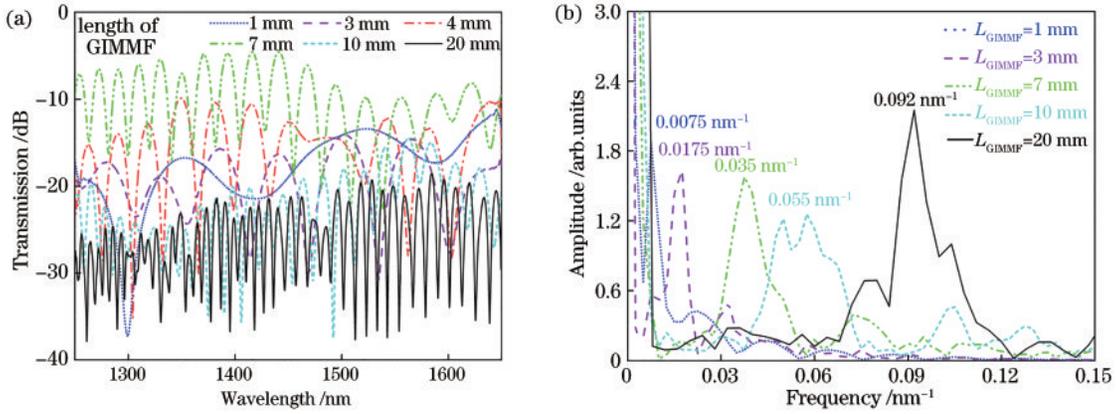


图 4 不同 GIMMF 长度的夹层多模光纤 MZI 的实验光谱和对应空间频谱图。(a) 透射光谱; (b) 空间频谱图

Fig. 4 Experimental spectra and corresponding spatial spectra of sandwich multimode fiber MZI with different GIMMF lengths.

(a) Transmission spectra; (b) spatial spectra

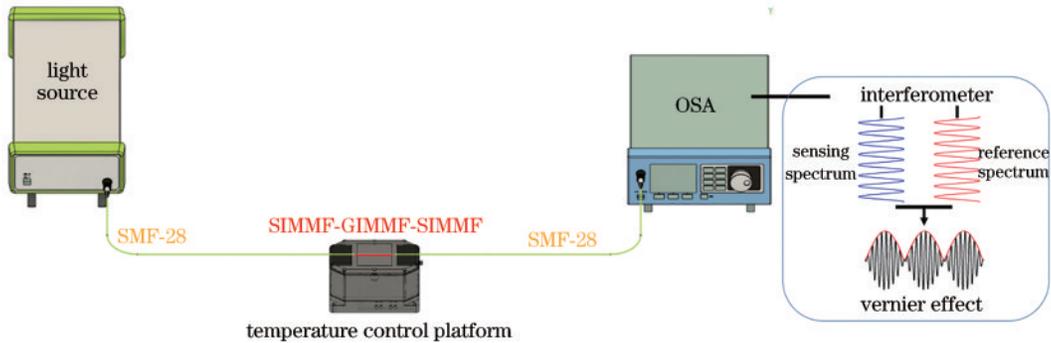


图 5 基于虚拟游标效应的夹层多模光纤 MZI 温度传感系统示意图

Fig. 5 Diagram of temperature sensing system based on sandwich multimode fiber MZI using visual vernier effect

1250~1650 nm 波长范围内的透射光谱, 对其进行 FFT 后, 在图 6(b) 频谱图中可以观察到峰值出现在  $0.092 \text{ nm}^{-1}$  处, 这对应 GIMMF 纤芯模和占主导的包层模之间的干涉, 利用带通滤波器提取主频分量 ( $0.092 \text{ nm}^{-1}$ ) 对应的干涉光谱并做归一化处理, 结果如图 6(c)~6(d) 所示。然后利用式 (4) 中的调制函数  $I_M(L_M=20 \mu\text{m})$  与图 6(c) 中归一化后的传感光谱函数  $I_S$  相乘对其调制, 结果如图 6(e)~6(f) 所示, 其频谱图中出现了 peak 2 ( $0.08 \text{ nm}^{-1}$ ) 和 peak 3 ( $0.1 \text{ nm}^{-1}$ ) 两个峰值, 这两个频率分量分别对应式 (5) 中的第二项和第三项。最后, 利用带通滤波器将 peak 2 对应频率分量提取出来作为参考光谱, 如图 6(g)~6(h) 所示。通过设定不同的调制长度  $L_M$  最终可以得到不同 FSR 的参考光谱, 将归一化后的传感光谱 [图 6(c)] 与设计好的参考光谱 [图 6(g)] 叠加后就可以形成虚拟游标效应。

为进一步分析调制长度  $L_M$  对游标光谱 FSR 的影响, 利用上述信号处理辅助方法对 4 种不同调制长度  $L_M$  (20、15、10、4.3  $\mu\text{m}$ ) 的虚拟游标光谱进行比较, 结果如图 7 所示。可见, 随着  $L_M$  的减小, 游标包络的 FSR 增大, 由式 (11) 可知, 此时对应的灵敏度放大倍数也越大。

### 3.3 基于虚拟游标效应的温度传感实验

采用所制作的  $L_{\text{GIMMF}}=20 \text{ mm}$  的 SIMMF-GIMMF-SIMMF 传感器进行温度传感实验。图 8 为无游标效应时单个传感器的温度响应, 随着温度的升高, 干涉峰发生红移, 在 1554 nm 波长附近温度灵敏度达到了  $104.07 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 分别比普通 FBG<sup>[16]</sup>、MM-HCF-MM<sup>[3]</sup>、MM-SMF-MM<sup>[4]</sup> 干涉结构的温度灵敏度高约 10 倍、3.5 倍、2 倍, 这是由于 GIMMF 纤芯和包层的热光系数差异较大<sup>[5,17]</sup> 的原因造成的。

图 9 为根据虚拟游标效应方法采用 4 种不同调制长度 (20、15、10、4.3  $\mu\text{m}$ ) 时叠加形成的游标包络的温度响应。可见, 随着温度的上升, 包络均发生红移, 对应的温度灵敏度分别为 0.9696、1.2650、1.9060、3.8840  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , 与图 8 中无游标效应的特征峰温度灵敏度相比, 分别放大了 9.323 倍、12.163 倍、18.327 倍、37.346 倍。通过式 (11) 计算得到的理论放大值分别为 8.99 倍、11.98 倍、18.07 倍、36 倍, 实验结果和理论计算基本吻合。根据式 (12) 可知,  $L_M=4.3 \mu\text{m}$  时, 在 1250~1650 nm 波长范围内只有一个游标包络, 此时放大倍数达到最大。由式 (11) 与式 (12) 可知, 放大倍数  $M$  由光谱仪的最大波长范围和干涉仪的 FSR 共同决定, 因此实际应用中可通过进一步缩小干涉仪的

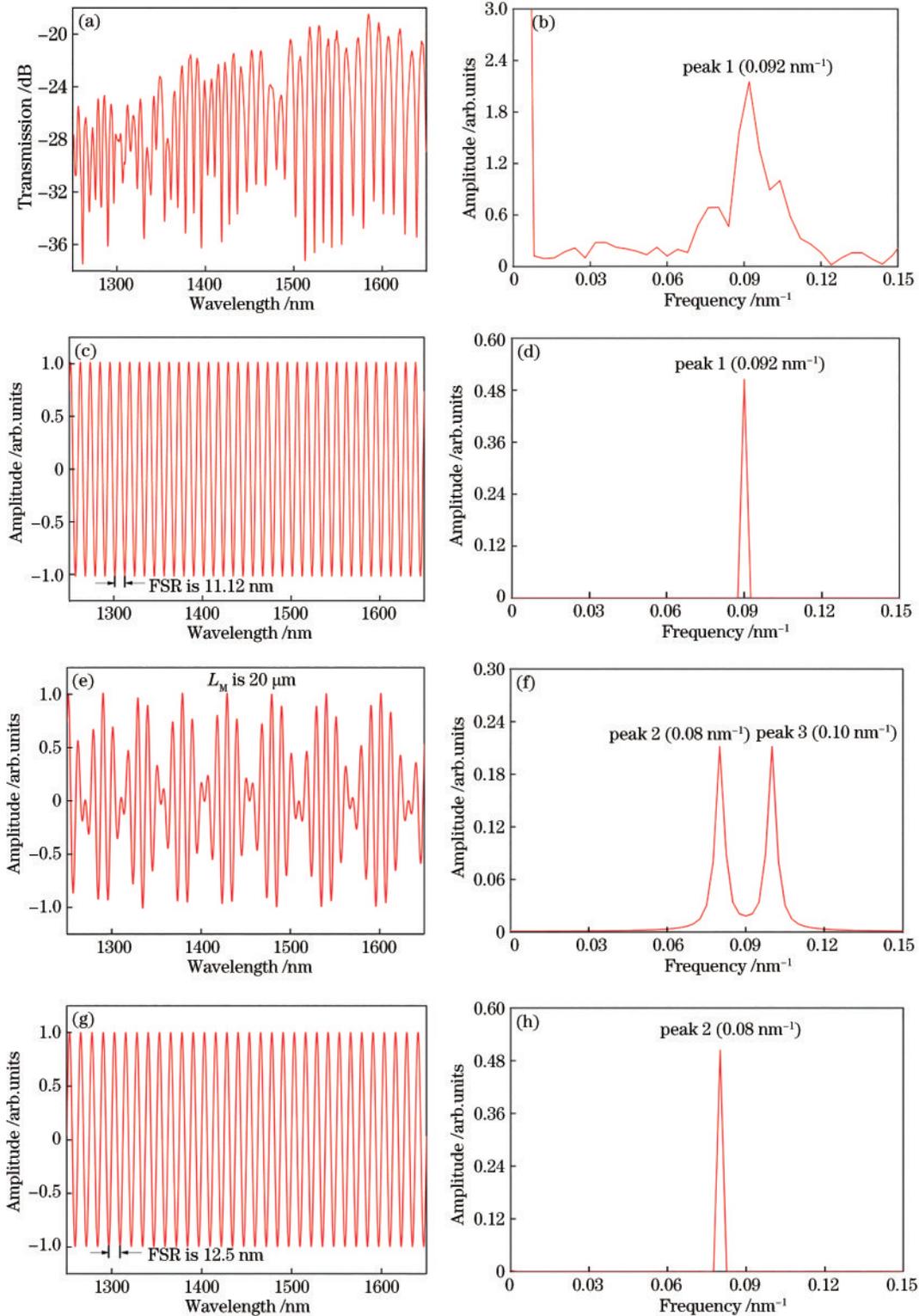


图6 对实验光谱进行变频处理提取参考光谱的步骤。(a)  $L_{\text{GIMMF}}=20$  mm时夹层多模光纤MZI的透射光谱;(b) 实验光谱的FFT结果;(c) 实验光谱中主频分量(peak 1)对应的的光谱;(d) peak 1对应光谱的FFT结果;(e) 利用调制函数IM ( $L_M=20$   $\mu\text{m}$ )对实验光谱进行调制后的光谱;(f) 调制后光谱的FFT结果;(g) 设计好的参考光谱(peak 2对应的的光谱);(h) 参考光谱的FFT结果

Fig. 6 Steps of extracting reference spectrum by frequency conversion processing of experimental spectrum. (a) Transmission spectrum of sandwich multimode fiber MZI when  $L_{\text{GIMMF}}=20$  mm; (b) FFT result of experimental spectrum; (c) spectrum corresponding to dominant frequency component (peak 1) in experimental spectra; (d) FFT result of spectrum corresponding to peak 1; (e) spectrum after modulating experimental spectrum with modulation function IM ( $L_M=20$   $\mu\text{m}$ ); (f) FFT result of modulated spectrum; (g) designed reference spectrum (spectrum corresponding to peak 2); (h) FFT result of reference spectrum

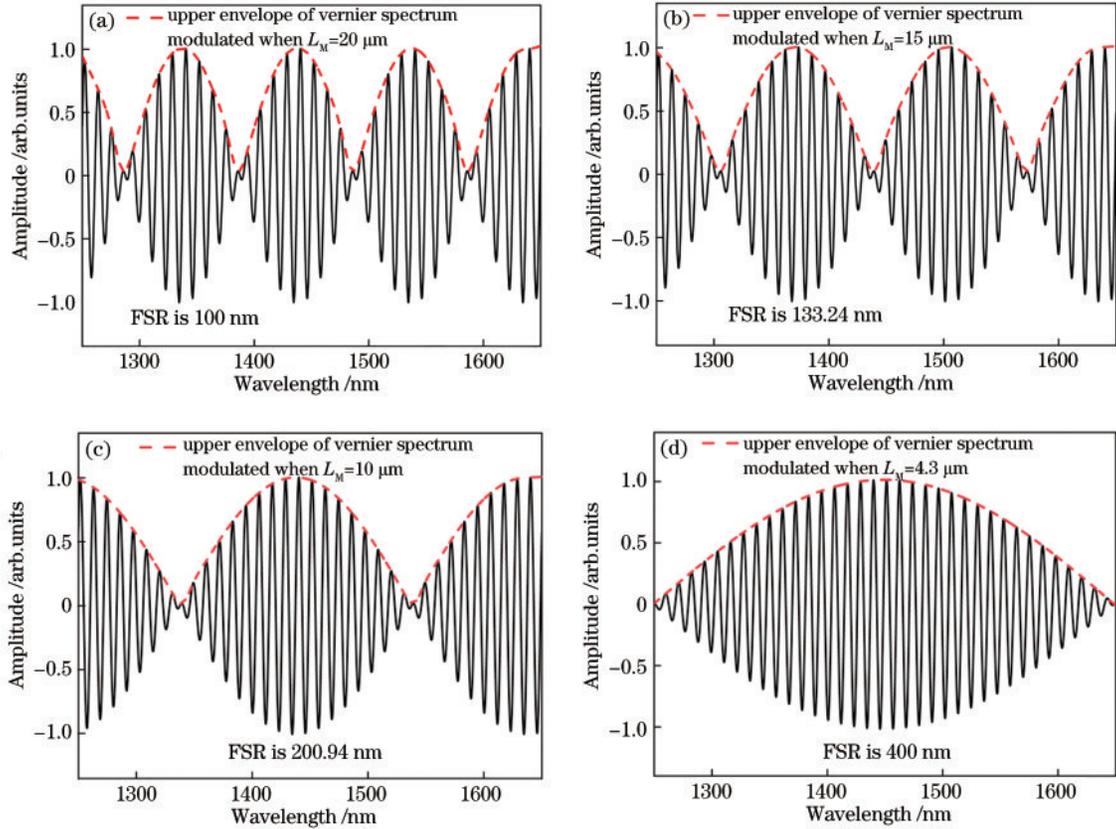


图 7 不同调制长度  $L_M$  的参考光谱与实验光谱叠加后形成的虚拟游标光谱。(a)  $L_M=20 \mu\text{m}$ ; (b)  $L_M=15 \mu\text{m}$ ; (c)  $L_M=10 \mu\text{m}$ ; (d)  $L_M=4.3 \mu\text{m}$

Fig. 7 Visual vernier spectra formed by superimposing reference and experimental spectra with different modulation lengths  $L_M$ . (a)  $L_M=20 \mu\text{m}$ ; (b)  $L_M=15 \mu\text{m}$ ; (c)  $L_M=10 \mu\text{m}$ ; (d)  $L_M=4.3 \mu\text{m}$

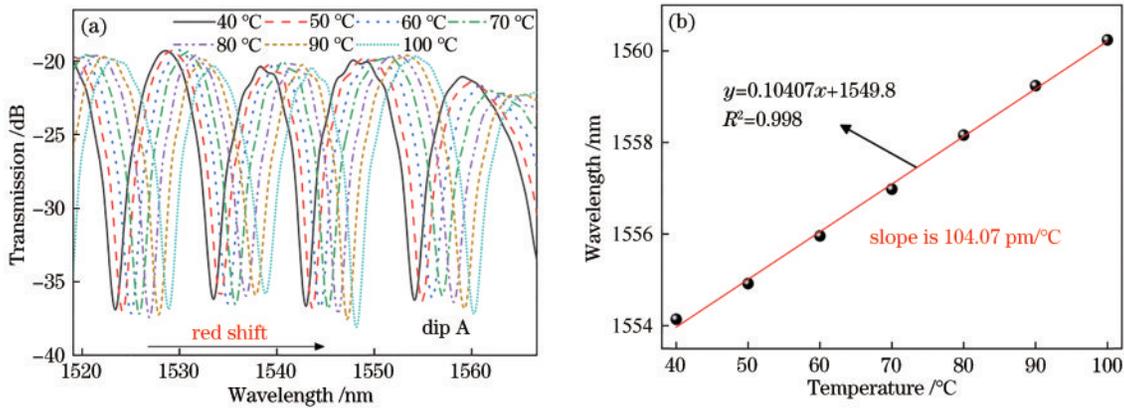


图 8 无游标效应时单个夹层多模光纤 MZI 的温度响应。(a) 光谱响应; (b) 特征波长与温度的关系

Fig. 8 Temperature response of a single sandwich multimode fiber MZI without visual vernier effect. (a) Spectral response; (b) relationship between characteristic wavelength and temperature

FSR 或者增大光谱仪的波长范围来得到一个更大的放大倍数。

最后将提出的传感器与其他基于游标效应的温度传感器进行了比较,如表 1 所示。与基于传统游标效应的温度传感器<sup>[18-22]</sup>不同的是,本文的参考光谱是通过传感臂光谱进行变频处理提取得到的,因此仅

需要一个干涉仪就能实现游标效应,该方法得到的参考光谱不受外界环境的影响,同时灵敏度放大倍数可调,只受光源的波长范围和干涉仪的 FSR 限制,且基于虚拟游标效应的 SIMMF-GIMMF-SIMMF 传感器具有更简单的结构、更稳定的性能和更高的温度灵敏度。

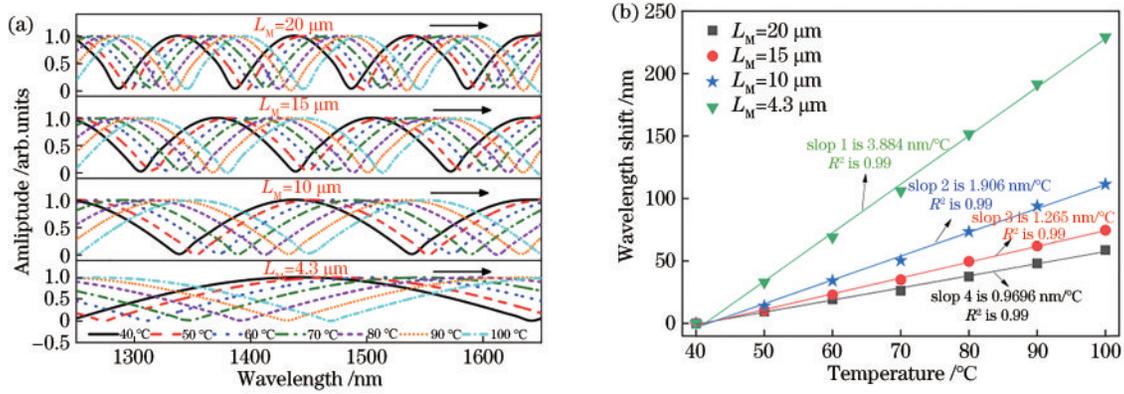


图9 不同FSR的虚拟游标包络的温度响应。(a) 光谱响应;(b) 特征波长与温度的关系

Fig. 9 Temperature response of virtual vernier envelopes for different FSRs. (a) Spectral response; (b) relationship between characteristic wavelength and temperature

表1 与其他光纤传感结构的性能比较

Table 1 Performance comparison with other fiber sensing structures

Fiber structure	Temperature sensitivity of single sensor $/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	Temperature sensitivity of vernier envelopes $/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$M$	Stability	Complexity
FPI (SMF+HCF+LMAF) <sup>[18]</sup>	7.30	-97.0	13.150	Medium	Medium
FPI (SMF+LA-HCF) <sup>[19]</sup>	86.10	-1081.0	12.550	Medium	High
FPI (SMF+Micro-hole+SMF) <sup>[20]</sup>	5.80	-180.5	31.120	Medium	High
MZI (offset splicing of SMF) <sup>[21]</sup>	45.36	397.4	8.700	Medium	High
MZI (MMF+DSHF+MMF) <sup>[22]</sup>	25.60	34.7	1.360	Medium	High
MZI (MMF+HCF+MMF) <sup>[3]</sup>	30.15	528.5	18.300	Medium	Low
Proposed	104.07	3884.0	37.346	High	Low

## 4 结 论

本文利用纤芯直径不同的SIMMF和GIMMF制作了一种新的夹层多模光纤MZI高灵敏度温度传感器,研究了GIMMF的长度对其透射光谱的影响。由于GIMMF纤芯和包层材料的热光系数差异较大,在40~100℃的温度范围内,单个夹层多模光纤MZI的温度灵敏度可以达104.07 pm/℃。将该夹层多模光纤MZI与虚拟游标效应结合进一步提升其温度灵敏度,夹层多模光纤MZI作为游标效应的传感臂,通过对其实验光谱进行空间频率变换设计出不同FSR的参考臂光谱,再叠加传感臂和参考臂的波形实现虚拟游标效应,最终温度灵敏度最高可达3.884 nm/℃,与单个夹层多模光纤MZI相比提高了37.346倍,与理论预测值基本一致。该灵敏度增强方法也适用于其他干涉条纹较杂乱的MZI,与传统光学游标效应传感器相比,它具有成本低、制作简单、结果更可靠等优点,在高灵敏度温度传感等领域具有重要的研究价值和应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 范维文, 万洪丹, 陈彧芳, 等. 基于二模-单模微纳光纤 Sagnac 环的高灵敏度光纤温度传感器[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1606001.
- [2] 付广伟, 刘畅, 王梦梅, 等. 基于表面石墨烯修饰的锥形多模光纤温度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0906002.
- [3] 陈彧芳, 万洪丹, 陈乾, 等. 基于稀土光纤双花生结的高灵敏度光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0110001.
- [4] Chen Y F, Wan H D, Chen Q, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on rare-earth-doped double-fiber peanut[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0110001.
- [5] Wo J H, Sun Q Z, Liu H, et al. Sensitivity-enhanced fiber optic temperature sensor with strain response suppression[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(4): 289-292.
- [6] Liu Y, Wei L. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers[J]. Applied Optics, 2007, 46(13): 2516-2519.
- [7] Wu Q, Hattar A M, Wang P F, et al. Use of a bent single SMS fiber structure for simultaneous measurement

Fan W W, Wan H D, Chen Y F, et al. Highly sensitive fiber optic temperature sensor based on two-mode single-mode microfiber Sagnac loop[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1606001.

- of displacement and temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(2): 130-132.
- [7] Yadav T K, Mustapa M A, Bakar M H A, et al. Study of single mode tapered fiber-optic interferometer of different waist diameters and its application as a temperature sensor[J]. Journal of the European Optical Society: Rapid Publications, 2014, 9: 14024.
- [8] Gomes A D, Bartelt H, Frazão O. Optical vernier effect: recent advances and developments[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(7): 2000588.
- [9] Li K, Zhang N, Zhang N M Y, et al. Birefringence induced Vernier effect in optical fiber modal interferometers for enhanced sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 275: 16-24.
- [10] Du D W, Xu C, Yang Z X, et al. Ultrasensitive temperature sensor and mode converter based on a modal interferometer in a two-mode fiber[J]. Optics Express, 2021, 29(20): 32135-32148.
- [11] 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: 3011-3016.
- [12] 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.
- [13] Hofmann P, Mafi A, Jollivet C, et al. Detailed investigation of mode-field adapters utilizing multimode-interference in graded index fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(14): 2289-2298.
- [14] Fang X H, Zhang W, Li J W, et al. Signal processing assisted Vernier effect in a single interferometer for sensitivity magnification[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 11570-11581.
- [15] Nguyen L V, Hwang D, Moon S, et al. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch[J]. Optics Express, 2008, 16(15): 11369-11375.
- [16] 申佳鑫, 王伟, 张军英, 等. 光纤布拉格光栅与空芯光纤多模干涉混合型温度应变双参量传感器[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0506006.
- Shen J X, Wang W, Zhang J Y, et al. Hybrid temperature and strain dual-parameter sensor based on fiber Bragg grating and multi-mode interference of hollow-core fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0506006.
- [17] Tripathi S M, Kumar A, Varshney R K, et al. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(13): 2348-2356.
- [18] Li Y N, Zhao C L, Xu B, et al. Optical cascaded Fabry-Perot interferometer hydrogen sensor based on vernier effect[J]. Optics Communications, 2018, 414: 166-171.
- [19] Kong L X, Zhang Y X, Zhang W G, et al. Cylinder-type fiber-optic Vernier probe based on cascaded Fabry-Perot interferometers with a controlled FSR ratio[J]. Applied Optics, 2018, 57(18): 5043-5047.
- [20] Zhang W, Liu Y G, Zhang T, et al. Integrated fiber-optic Fabry-Pérot interferometer sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(13): 5007-5013.
- [21] Liao H, Lu P, Fu X, et al. Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach-Zehnder Interferometer sensors with modified Vernier-effect[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26898-26909.
- [22] Lin H F, Liu F F, Guo H Y, et al. Ultra-highly sensitive gas pressure sensor based on dual side-hole fiber interferometers with Vernier effect[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28763-28772.