

DOI:10.16136/j.joel.2023.07.0677

# 基于磁流体磁体积效应的磁场与温度双参量传感器

和 亮<sup>1\*</sup>, 魏西媛<sup>1</sup>, 廖 娜<sup>1</sup>, 马丽娟<sup>1</sup>, 闫红来<sup>1</sup>, 王 伟<sup>2</sup>

(1. 西安外事学院 工学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 为了实现磁场与温度的同时测量, 提出并制作了一种基于磁流体(magnetic fluid, MF)磁体积效应的法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)腔与光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)级联的复合传感结构。注入空芯光纤(hollow-core fiber, HF)的 MF 液面与单模光纤端面形成的 FP 腔同时对磁场和温度敏感, 与之级联的 FBG 只对温度敏感。通过同时监测 FP 腔特征峰与 FBG 布拉格反射峰的波长漂移, 利用传感器磁场与温度敏感系数矩阵, 同时获取温度与磁场信息。实验成功制备了初始腔长为 56.1  $\mu\text{m}$  的 FBG-FP 温度磁场双参量传感器, 磁场与温度灵敏度分别达到了 16.21 pm/Oe 和 9.96 pm/ $^{\circ}\text{C}$ , 具有体积小、结构简单、成本低等特点。该传感器可解决常规光纤磁场传感器的磁场-温度交叉敏感问题。

**关键词:** 空芯光纤(HF); 磁流体(MF); 法布里-珀罗(FP)腔; 光纤布拉格光栅(FBG)

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)07-0698-06

## Magnetic field and temperature dual-parameter sensor based on magneto-volume effect of magnetic fluid

HE Liang<sup>1\*</sup>, WEI Xiyuan<sup>1</sup>, LIAO Na<sup>1</sup>, MA Lijuan<sup>1</sup>, YAN Honglai<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1. Engineering College, Xi'an International University, Xi'an, Shannxi 710077, China; 2. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shannxi 710021, China)

**Abstract:** In order to realize simultaneous measurement of magnetic field and temperature, a composite sensing structure based on the magneto-volume effect of magnetic fluid (MF), a Fabry-Perot (FP) cavity and fiber Bragg grating (FBG) cascaded structure is proposed and fabricated. The FP cavity formed by the liquid interface of the MF injected into the hollow-core fiber (HF) and the end face of the single-mode fiber are both sensitive to magnetic field and temperature, and the cascaded FBG is only sensitive to temperature. By simultaneously monitoring the wavelength drift of FP cavity characteristic peak and FBG Bragg reflection peak, the magnetic field and temperature sensitivity coefficient matrix is used to obtain the temperature and magnetic field information simultaneously. An FBG-FP temperature and magnetic field dual parameter sensor with an initial cavity length of 56.1  $\mu\text{m}$  is successfully fabricated, of which the magnetic field and temperature sensitivity of are 16.21 pm/Oe and 9.96 pm/ $^{\circ}\text{C}$ , respectively. The sensor has the characteristics of small volume, simple structure and low cost, which can be applied to solve the magnetic field strength and temperature cross-sensitivity problem of conventional fiber-optic magnetic field sensors.

**Key words:** hollow-core fiber (HF); magnetic fluid (MF); Fabry-Perot (FP) cavity; fiber Bragg grating (FBG)

## 0 引 言

在航空航天、军事工程、工业、医疗等领域中,

磁场的监测尤为重要<sup>[1]</sup>。相比于传统的磁场传感器, 光纤磁场传感器由于其具有尺寸小、结构简单、不易受到化学腐蚀等优点备受研究者的关

\* E-mail: heliang@xaiu.edu.cn

收稿日期: 2022-10-07 修订日期: 2022-12-10

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-197)和陕西省教育厅重点研究计划项目(22JY026)资助项目

注<sup>[2-4]</sup>。最为典型的光纤磁场传感器是法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 光纤磁场传感器<sup>[5,6]</sup>。

FP 光纤磁场传感器的优势在于灵敏度高、分布式检测、结构紧凑、遥感能力强等<sup>[7]</sup>。LV 等<sup>[8]</sup>将磁流体 (magnetic fluid, MF)<sup>[9-11]</sup>填充到 FP 腔, 制成 FP 光纤磁场传感器, 磁场灵敏度为 43.1 pm/Gs。ZHENG 等<sup>[12]</sup>在空芯光纤 (hollow-core fiber, HF) 中填充 MF, 并在其上制作微流控通道, 磁场测量灵敏度可达到 418.7 pm/Gs, 但磁场的检测范围仅仅达到 0—10 Gs。由于 FP 腔以及 MF 都会受到温度的干扰, 因此存在磁场-温度交叉敏感的问题<sup>[13-15]</sup>。

传统的光纤磁场传感器受磁场-温度交叉敏感的影响, 磁场测量灵敏度较低, 且难以满足实际的工程要求。为此, 研究者们提出了双参量测量传感器。ZHAO 等<sup>[16]</sup>制作了一个将 MF 密封于毛细玻璃管的 FP 传感器并联合光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 来调制 FP 传感器的反射谱, 得到 MF 灵敏度为 0.04 nm/Gs, 温度灵敏度为 0.02 nm/℃。LUO 等<sup>[17]</sup>将微结构光纤 (MOF) 和长周期光纤光栅进行熔接, 实现磁场灵敏度为 0.005 2 nm/Oe, 温度灵敏度为 0.044 9 nm/℃。BHARDWAJ 等<sup>[18]</sup>提出了一种温度与磁场传感器, 实现了磁场灵敏度为 0.993 dB/mT, 温度灵敏度为 0.050 2 dB/℃。LI 等<sup>[19]</sup>提出一种 MF FP 传感器和光纤光子晶体级联的双参数传感器, 通过监测反射光谱和透射光谱的偏移来实现磁场和温度的同时测量。

为解决磁场测量中磁场-温度交叉敏感问题, 本文提出并实现了一种基于 MF 的 FP 温度与磁场传感器。将 HF 和单模光纤熔接后在 HF 端注入少量 MF 形成 FP 腔, 该 FP 腔反射端由光纤端面 and MF 端面构成, 空气腔长度将随 MF 的体积而变化。由于磁场的磁体积效应, 传感器的反射光谱随外磁场的变化而变化。为解决 MF 存在的热膨胀效应, 将 FBG 与 FP 腔熔接, 通过 FBG 来达到对 MF 的温度补偿, 实现了该传感结构对磁场和温度的同时测量, 磁场灵敏度和温度灵敏度分别为 16.21 pm/Oe 和 9.96 pm/℃。

## 1 FP 腔磁场与 FBG 温度测量原理

本文提出的 FBG-FP 温度磁场双参量传感器由 FBG 与 FP 腔构成, 基本结构如图 1 所示。该传感器由单模光纤和 HF 熔接而成, 在单模光纤中间位置有一段 FBG, 在 HF 的一端注入 MF, 其中单模光纤的端面与 MF 的端面构成 FP 微腔。

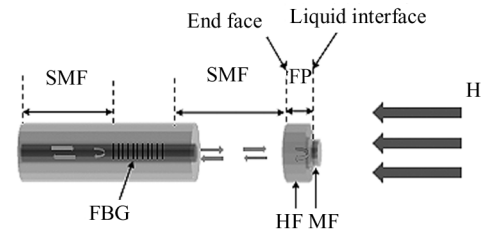


图 1 传感器结构图

Fig. 1 Sensor structure

### 1.1 磁场传感原理

如图 1 所示, FBG-FP 温度磁场双参量传感器的磁场测量由 FP 微腔完成, 入射光通过单模光纤端面时一部分光反射回去, 另一部分光继续进行传输, 在经过空气腔到达 MF 端面时, 一部分光反射回去, 另一部分光被 MF 吸收。两个端面反射光的强度可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi n_{\text{air}} L_{\text{air}}}{\lambda}\right), \quad (1)$$

式中,  $I_1$ 、 $I_2$  分别是单模光纤端面和 MF 端面的反射光强,  $\lambda$  是波长,  $n_{\text{air}}$  是空气折射率,  $L_{\text{air}}$  是空气的长度。

当相位差满足  $(2m+1)\pi$  时, 输出光强达到最小值, 干涉峰波长  $\lambda_m$  可以表示为:

$$\lambda_m = \frac{4n_{\text{air}} L_{\text{air}}}{2m+1}, (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (2)$$

两个相邻干涉波长之间的自由光谱范围可以表示为:

$$\text{FSR} = \lambda_{m+1} - \lambda_m = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{2n_{\text{air}} L_{\text{air}}}. \quad (3)$$

当外部磁场  $H$  施加到轴向传感器时, MF 的磁体积效应将导致磁体积减小从而导致空气腔长增大, 干涉波长偏移  $\Delta\lambda_m$  可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_m} = \frac{\Delta L_{\text{air}}(H)}{L_{\text{air}}}. \quad (4)$$

### 1.2 温度传感原理

本文所研究 FBG-FP 温度磁场双参量传感器的温度测量由 FBG 完成, 光源发出的光进入 FBG 后一部分反射回去, 另一部分光透射进去。FBG 反射中心波长为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda, \quad (5)$$

式中,  $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率,  $\Lambda$  为栅格周期。

对于 FBG 而言, 只受温度影响, 如果温度变化为  $\Delta T$ , 则波长变化<sup>[20]</sup>:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\xi + \alpha) \Delta T, \quad (6)$$

式中,  $\xi$  是光纤光栅的热光系数,  $\alpha$  是光纤光栅的热膨胀系数。

### 1.3 温度补偿原理

对于 FP 腔和 FBG 的级联结构,同时改变磁场和温度时,FP 腔和 FBG 的反射谱都会发生漂移变化。由于两种结构的热光系数、有效弹光系数等不同,因此两种结构的温度灵敏度以及磁场灵敏度也不尽相同。所以只要确定灵敏度系数矩阵,就可以通过 FP 腔以及 FBG 的波长变化得到对应的温度以及磁场强度,其相对应变换关系如下所示<sup>[21]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{FP}} \\ \Delta \lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中,  $\Delta \lambda_{\text{FP}}$  为 FP 腔反射谱波长变化,  $\Delta \lambda_{\text{FBG}}$  为 FBG 反射谱波长变化,  $\Delta H$  为磁场变化,  $K_{11}$ 、 $K_{12}$  分别为 FP 腔对应的温度灵敏度、磁场灵敏度,  $K_{21}$ 、 $K_{22}$  分别为 FBG 对应的温度灵敏度、磁场灵敏度,可分别通过温度和磁场加载实验以线性拟合的方式标定。  $K_{11}$ 、 $K_{12}$ 、 $K_{21}$ 、 $K_{22}$  构成了 FBG-FP 温度磁场双参量传感器的敏感系数矩阵。

## 2 传感器结构与制作

FBG-FP 温度磁场双参量传感器由 FBG 与 FP 腔构成,其中 FBG 使用普通的 FBG 光栅,FP 腔由单

模光纤、75  $\mu\text{m}$  的 HF 以及 MF 组成。传感器制作步骤如下:

首先,将单模光纤与 HF 各自一端去除一段长度的涂覆层后,用光纤切割刀切割,使其端面垂直于光纤轴线。然后利用熔接机将切割后的单模光纤和 HF 一端进行熔接。

其次,在显微镜下,将 HF 和单模光纤的熔接点放置在光纤切割刀峰上,然后通过调节五维调节架切割 HF 65  $\mu\text{m}$ 。然后将少量 MF 从 HF 的另一端注入,并使用紫外胶进行密封,这样便形成由单模光纤、HF 以及 MF 构成的 FP 腔。

再次,将制好的 FP 腔另一端(单模光纤另一端)去除一段长度的涂覆层,用光纤切割刀切割,使其端面垂直于光纤轴线。然后将自己刻好的 FBG 的一端去除一段长度的涂覆层,用光纤切割刀切割,使其端面垂直于光纤轴线。

最后,将上述第三步中的 FP 与 FBG 切割好的一端使用光纤熔接机进行熔接。

本文按照如上步骤制作了一个室温下初始腔长为 56.1  $\mu\text{m}$  的 FBG-FP 温度磁场双参量传感器,如图 2 所示。

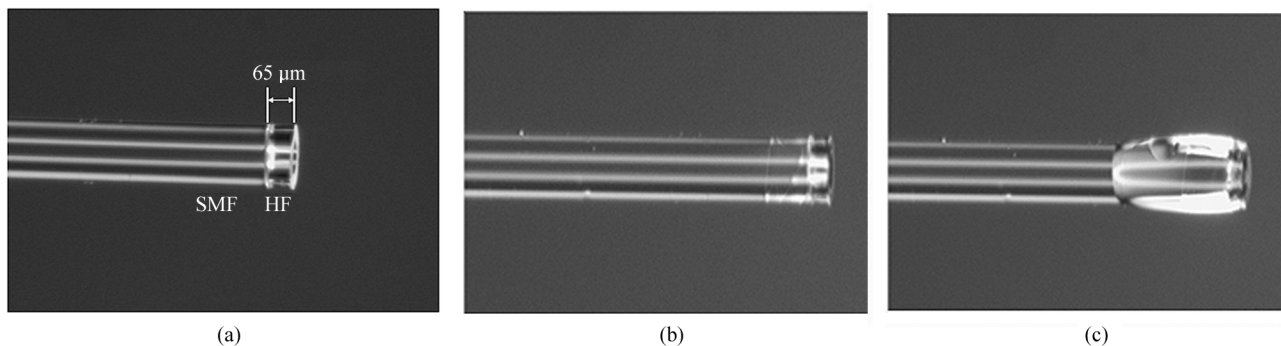


图 2 FBG-FP 磁场温度传感头显微照片:(a) 单模光纤与空芯光纤熔接;(b) 注入磁流体;(c) 封紫外胶

Fig. 2 Micrograph of FBG-FP magnetic field temperature sensor head: (a) Single-mode optical fiber and hollow-core optical fiber fusion; (b) Magnetic fluid injection; (c) UV sealing

## 3 实验搭建与测量分析

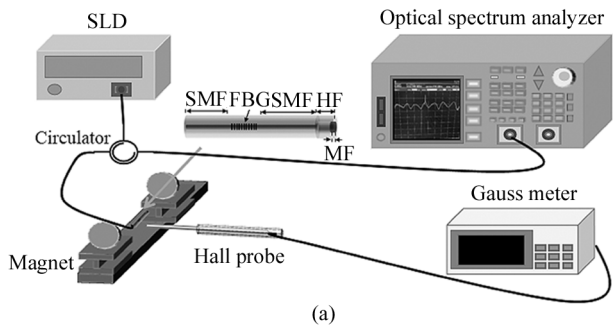
如图 3 所示,实验分别搭建了温度磁场双参量测试系统,对所提出和制作的 FBG-FP 温度磁场双参量传感器进行温度和磁场测试。所使用器件分别为 SLD 光源、光纤环形器、光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)、加热平台、磁铁、霍尔探头以及 FBG-FP 温度磁场双参量传感器。

### 3.1 磁场实验与分析

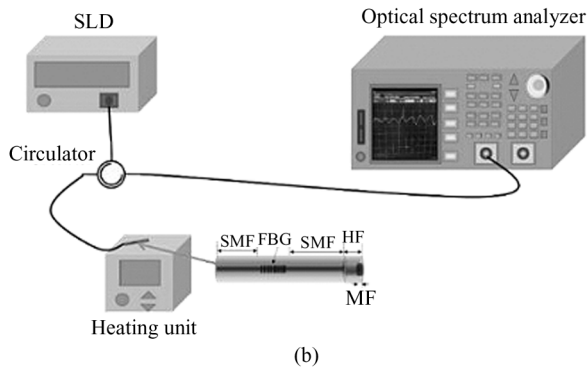
磁场实验如图 3(a)所示。将该传感器放置在装有磁铁的平台上,SLD 光源输出的光经过环形器将传感器反射回来的光传输至光谱仪。磁铁产生平行于传感器轴向的磁场,通过改变磁铁的位置来改变 MF 所在位置的磁场强度,并通过霍尔探头来获取磁场强度。

在室温条件下,磁场为 0 Oe 时,光谱仪获取的反射光谱如图 4 所示,在反射谱中,出现多峰干涉信号

以及一个尖锐反射峰,多峰信号来自于 FP 腔的反射,尖锐信号来自 FBG 的反射。



(a)



(b)

图 3 实验测试系统示意图:(a) 磁场实验图;  
(b) 温度实验图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental test system:  
(a) Magnetic field experiment diagram;  
(b) Temperature experiment diagram

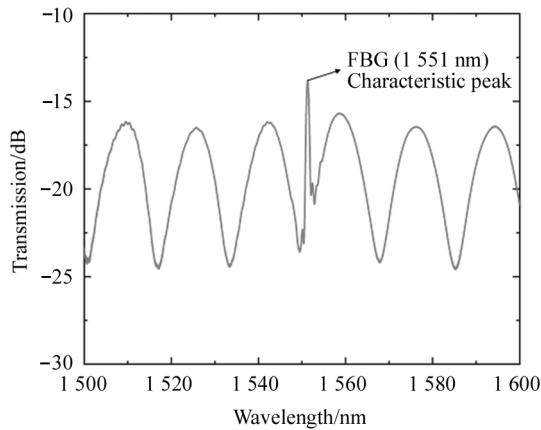


图 4 FBG-FP 磁场温度传感器反射光谱

Fig. 4 Reflection spectrum of FBG-FP magnetic field temperature sensor

实验开始后,调整磁铁位置,改变室温时传感器所在位置的磁场强度。每 20 Oe 记录一次光谱数据,图 5 所示为磁场从 0—120 Oe 的反射光谱曲线总图及其局部放大图。从图 5 可知随着磁场强度的增

大,整个反射光谱曲线向波长增大的方向偏移。这表明:磁场强度增大过程中 MF 的体积发生变化,并导致该传感器 FP 腔腔长发生变化。

由图 5 可知,当磁场发生变化时,FBG 的中心波长几乎不发生漂移,对于外界的磁场并不敏感。选取 A 附近波峰为 FP 腔反射谱的特征峰,绘制特征峰峰值波长随磁场变化关系,如图 6 所示。可以看出,波长偏移随着磁场变化在缓慢增加,磁场每增加 20 Oe,峰值波长向长波长方向漂移 0.3 nm 左右。在磁场增大过程中,共向长波长方向漂移了 2 nm 左右,其线性度  $R^2$  为 0.937 67,传感器磁场测量灵敏度为 16.21 pm/Oe。

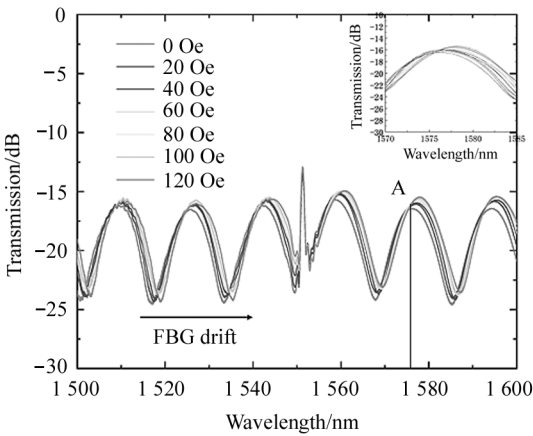


图 5 不同磁场下反射光谱曲线

Fig. 5 Reflection spectrum curve under different magnetic fields

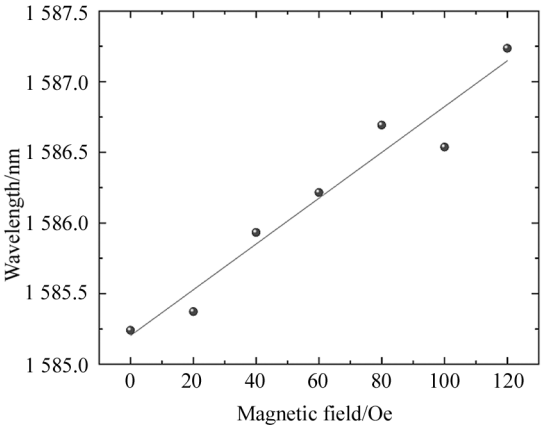


图 6 FP 腔特征峰峰值波长随磁场变化关系

Fig. 6 Variation of characteristic peak wavelength of FP cavity with magnetic field

### 3.2 温度实验与分析

温度实验如图 3(b)所示。将该传感器放置在加热平台上,SLD 光源输出的光经过环形器将传感器反射回来光信号传输至光谱仪。在进行温度实验

时,从 35 ℃ 开始进行反射光谱数据记录,每 5 ℃ 记录一次反射光谱数据,图 7 记录的是温度从 35—80 ℃ 的反射光谱曲线。可以看出:随着温度的升高,传感器显示出从 35—80 ℃ FP 腔反射光谱曲线向波长减小的方向漂移,FBG 反射光谱曲线向波长增大的方向漂移,并且峰值以及形状变化微小,反射功率变化几乎忽略不计。

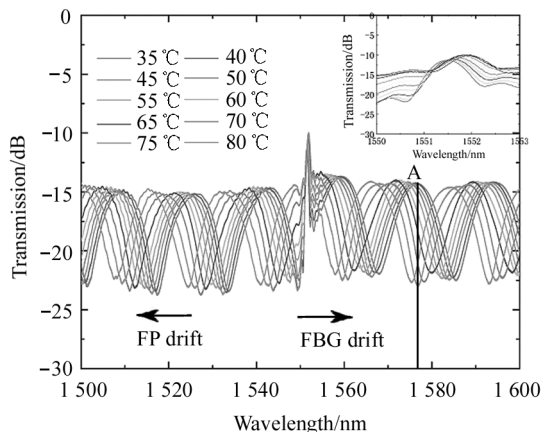
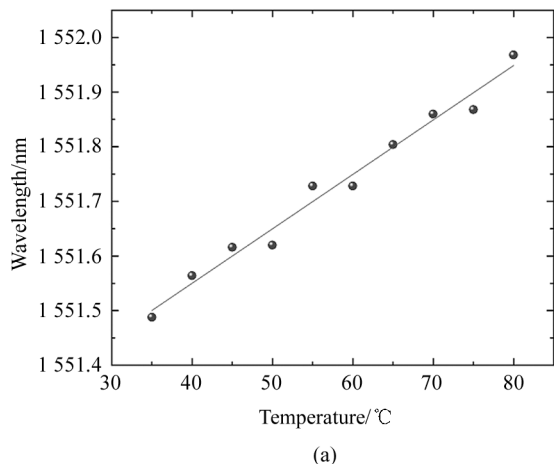


图 7 不同温度下的反射光谱曲线

Fig. 7 Reflection spectrum curve at different temperatures

在图 7 的反射谱中,选取 A 附近波峰以及 FBG 反射谱作为特征峰,绘制特征峰峰值波长随温度的变化关系,如图 8 所示。可以看出,FBG 特征峰峰值波长随温度增加均匀向波长增大的方向漂移,温度每上升 5 ℃,峰值波长向长波长方向漂移 70 pm 左右,在温度上升过程中共向长波长方向漂移 0.47 nm 左右,其线性度  $R^2$  为 0.9725,温度测量灵敏度为 9.96 pm/℃。FP 腔特征峰峰值波长随温度的增加均匀向波长减小的方向漂移,其线性度  $R^2$  为 0.9435,温度测量灵敏度为 -234.67 pm/℃。



(a)

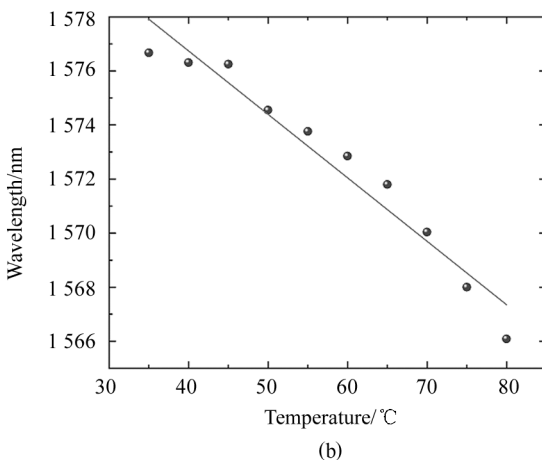


图 8 (a) FBG 特征峰峰值波长和 (b) FP 腔特征峰峰值波长随温度的变化关系

Fig. 8 Variations of (a) FBG characteristic peak wavelength and (b) FP cavity characteristic peak wavelength with temperature

将求得的 FP 腔对应温度灵敏度、磁场灵敏度以及 FBG 对应温度灵敏度、磁场灵敏度代入式 (7),得到该传感器的磁场、温度测量矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -234.67 & 16.21 \\ 9.96 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{FP} \\ \Delta \lambda_{FBG} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

通过监测 FBG 以及 FP 腔反射光谱的特征峰波长漂移并代入式 (8),可以得到温度与磁场强度的变化。

## 4 结 论

本文提出了一种结合 FBG 温度测量与 FP 腔磁场测量的光纤 FBG-FP 混合型双参量传感器,并进行了实验验证。该传感器由一根刻有一段 FBG 的单模光纤与一根 HF 相熔接,并在 HF 的另一端注入 MF,由单模光纤端面与 MF 端面形成了 FP 腔。利用该传感结构对磁场、温度进行了实验测量。实验结果表明,对于初始腔长为 56.1 μm 的 FBG-FP 温度磁场双参量传感器,磁场灵敏度达到 16.21 pm/Oe,温度灵敏度达到 9.96 pm/℃。总之,该传感器具有重复性好、制作简单、成本低等优点,而且为光纤温度、磁场双参量测量提供了一种思路。

## 参考文献:

- [1] SEARS J A, ZHAO Y, XU Z, et al. Phase diagram of  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  in an in-plane magnetic field[J]. Physical Review B, 2017, 95(18): 248-252.
- [2] LI X G, ZHANG Y N, ZHOU X, et al. Simultaneous measurement of electric field and strain with a tandem-interfer-

- ometric device[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(4): 965-970.
- [3] NAIR A M, DHAWANGALE A, HANDRA S C, et al. Polymer-coated fiber optic sensor as a process analytical tool for biopharmaceutical impurity detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7666-7674.
- [4] ZHAO Y, DENG Z Q, HU H F. Fiber-optic SPR sensor for temperature measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(11): 3099-3104.
- [5] WENG F F, LI Y Q, WANG S L, et al. Interferometric fiber optic temperature and magnetic field measurement sensor based on magnetic fluid[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(4): 488-492.
- 温芳芳, 李永倩, 王劭龙, 等. 基于磁流体的干涉型光纤温度与磁场双测量传感器[J]. 半导体光电, 2021, 42(4): 488-492.
- [6] DUAN M S, LI P, LIU S C. Optical fiber magnetic field sensors[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2020, 37(4): 477-483.
- 段沐森, 李鹏, 刘盛春. 光纤磁场传感器[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2020, 37(4): 477-483.
- [7] ZHAO Y, WANG X X, LV R Q, et al. Reflective highly sensitive Fabry-Perot magnetic field sensor based on magneto-volume effect of magnetic fluid[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-6.
- [8] LV R Q, ZHAO Y, WANG D, et al. Magnetic fluid-filled optical fiber Fabry-Pérot sensor for magnetic field measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(3): 217-219.
- [9] GAO R, JIANG Y, ABDELAZIZ S. All-fiber magnetic field sensors based on magnetic fluid-filled photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2013, 38(9): 1539.
- [10] ZHOU X, LI X, LI S, et al. Magnetic field sensing based on SPR optical fiber sensor interacting with magnetic fluid[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(1): 234-239.
- [11] CAO Y, LIU H Y, TONG Z R, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer cascaded with a fiber long-period fiber grating[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(1): 69-72.
- [12] ZHENG Y, LI H C, YANG J, et al. Fiber optic Fabry-Pérot optofluidic sensor with a focused ion beam ablated microslot for fast refractive index and magnetic field measurement[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 322-326.
- [13] WU Q, ZHANG Z Y, GUO X C, et al. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on photonic crystal fiber with eliminating cross-sensitivity[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(18): 184212.
- 吴倩, 张诸宇, 郭晓晨, 等. 基于光子晶体光纤交叉敏感分离的磁场温度传感研究[J]. 物理学报, 2018, 67(18): 184212.
- [14] BAO K Q, NI R, ZHANG X J. Research on cross sensitivity of optical fiber sensor based on optimized demodulation algorithm[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(3): 17-21.
- 鲍克勤, 倪蓉, 张雪健. 基于优化解调算法的光纤传感器交叉敏感问题研究[J]. 光通信技术, 2020, 44(3): 17-21.
- [15] HAN X X, JING Y J, YANG H K, et al. Study on temperature compensation of GMM-FBG fiber optic current sensor[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(8): 787-793.
- 韩笑笑, 荆雅洁, 杨濠琨, 等. GMM-FBG 光纤电流传感器温度补偿研究[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(8): 787-793.
- [16] ZHAO Y, LU R Q, WANG D, et al. Fiber optic Fabry-Perot magnetic field sensor with temperature compensation using a fiber Bragg grating[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(9): 2210-2214.
- [17] LUO J, ZHANG G, XIE N, et al. A magnetic sensor based on a hybrid long-period fiber grating and a magnetic fluid[J]. Photonics Technology Letters, 2015, 27(9): 998-1001.
- [18] BHARDWAJ V, SINGH V K. A novel use of etched multi-mode fibre as magnetic field sensor[J]. IET Optoelectronics, 2017, 11(6): 248-252.
- [19] LI X G, ZHAO Y, CAI L, et al. Measurement of magnetic field and temperature based on fiber-optic composite interferometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1906-1911.
- [20] SHENG J X, WANG W, ZHAO Q, et al. A fiber grating and Fabry-Perot microcavity sensor for temperature and strain measurement[J]. Laser Journal, 2021, 42(2): 16-20.
- 申佳鑫, 王伟, 赵琼, 等. 光纤光栅与法珀微腔温度应变双参量传感器[J]. 激光杂志, 2021, 42(2): 16-20.
- [21] LIU T G, CHEN Y F, HAN Q, et al. Magnetic field sensor based on U-bent single-mode fiber and magnetic fluid[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 1-7.

#### 作者简介:

和亮 (1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光纤传感和信号处理方面的研究。