

引用本文: 冯森林, 王兆香, 王谦, 等. 一种用于同时测量温度和磁场强度的磁流体 LPFG-FBG 传感器[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 28–33.

一种用于同时测量温度和磁场强度的磁流体 LPFG-FBG 传感器

冯森林, 王兆香, 王谦, 于天琦, 范方俊, 龚晓敏, 杨佳东

(中国电子科技集团公司 第五十二研究所, 杭州 311100)

摘要: 针对现有光纤传感器测量温度、磁场强度时灵敏度较低的问题, 提出了一种基于光信号的光纤温度磁场传感器。传感器以长周期光纤光栅(LPFG)级联光纤布喇格光栅(FBG)作为传感结构, 以磁流体作为磁性敏感材料, 采用 HF 溶液腐蚀光纤包层来提高灵敏度。首先介绍了传感器实现温度和磁场强度的双参量测量原理, 然后利用 Optigrating 仿真软件对 LPFG-FBG 传感单元进行模拟仿真, 最后根据仿真结果制作传感器并搭建实验环境进行温度和磁场强度的测量实验。实验结果表明: 当温度为 35~85 °C 时, 传感器的温度灵敏度为 85.7 pm/°C; 当磁场强度为 4~20 mT 时, 磁场强度灵敏度为 65 pm/mT, 且稳定性良好。

关键词: 长周期光纤光栅; 光纤布喇格光栅; 磁流体; 温度; 磁场强度

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)02-0028-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Magnetic fluid LPFG-FBG sensor for measuring temperature and magnetic field intensity simultaneously

FENG Senlin, WANG Zhaoxiang, WANG Qian, YU Tianqi, FAN Fangjun, GONG Xiaomin, YANG Jiadong

(The 52th Research Institute of CETC, Hangzhou 311100, China)

Abstract: In view of the low sensitivity of existing optical fiber sensors in measuring temperature and magnetic field intensity, a optical fiber temperature and magnetic field sensor based on optical signal is proposed. The sensor designed has a long period fiber grating (LPFG) cascaded short period fiber Bragg grating (FBG) as the sensing structure. The magnetic fluid is used as magnetic sensitive material. The sensitivity is improved by using HF solution to etch the optical fiber cladding. Firstly, the principle of measuring temperature and magnetic field intensity by this sensor is introduced. Then, the LPFG-FBG sensor structure is simulated by using Optigrating simulation software. Finally, the sensor is desinged and the experiments of measuring temperature and magnetic field intensity is conducted according to the simulation results. The experimental results show that the sensitivity of the sensor is 85.7 pm/°C when the temperature is 35~85 °C. When the magnetic field intensity ranges from 4~20 mT, the sensitivity of magnetic field intensity is 65 pm/mT, and the stability is good.

Key words: long period fiber grating, fiber Bragg grating, magnetic fluid, temperature, magnetic field intensity

0 引言

在电学领域中, 温度和磁场传感器发展较为成熟, 该类传感器一般将外界温度和磁场强度的变化转换为电信号, 并通过检测电信号的变化情况来达到测

收稿日期: 2022-12-13。

作者简介: 冯森林(1996—), 男, 硕士, 河南郑州人, 毕业于中国计量大学光学与电子科技学院光学工程专业, 研究生期间主要从事光纤传感技术领域的研究工作, 并发表相关的发明专利。现就职于中国电子科技集团公司第五十二研究所, 主要从事服务器的电路系统研发工作。



量温度和磁场强度的目的^[1-4]。然而, 这种传感器存在设备体积大、测量精度低、抗电磁干扰能力弱、灵敏度低、测量参量单一等缺点。在光学领域中, 光纤传感器不仅体积小、测量精度高、抗电磁干扰能力强、灵敏度高, 还可以通过灵活设计来实现多参量测量和降低干扰参量的影响^[5-15]。磁流体作为磁性敏感材料, 常与不同的传感结构相组合, 方便传感器实现对外界磁场强度的测量。CHEN Y F 等人^[16]设计了一种宏弯光纤布喇格光栅(FBG)温度磁场传感器, 将 FBG 刻制在普通单模光纤一侧上, 并将另一侧弯曲成直径为 4 mm 的圆环, 最后将该传感结构封装于充满磁流体的铁氟

龙管中。该传感器温度灵敏度为 $8.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 磁场强度灵敏度为 $1\,426 \text{ pm}/\text{mT}$ 。为了提高磁场强度测量的精度, 梁星等人^[17]设计了一种磁流体封装薄包层 FBG 的磁场传感器, 当磁场强度为 $5\sim 20 \text{ mT}$ 时, 传感器的磁场强度灵敏度、温度灵敏度分别为 $34.9 \text{ pm}/\text{mT}$ 、 $9.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。为了扩大磁场强度测量的范围, 吴磊等人^[18]设计了一种混并式长周期光纤光栅 (LPFG)、FBG 温度磁场传感器, 使用酯基磁流体作为磁场敏感材料, 当温度为 $15\sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 温度灵敏度为 $44.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$; 磁场强度为 $0\sim 75 \text{ mT}$ 时, 磁场强度灵敏度为 $52.3 \text{ pm}/\text{mT}$ 。

上述光学领域的光纤传感器虽然实现了温度和磁场双参量测量, 但其测量温度和磁场强度时的灵敏度较低。因此, 本文设计的光纤传感器以 LPFG 级联 FBG (下文简称 LPFG-FBG) 作为温度磁场传感结构, 利用 HF 溶液腐蚀光纤包层并封装磁流体来提高灵敏度。

1 磁流体 LPFG-FBG 传感器

1.1 原理分析

磁流体具有磁致折射率特性, 根据郎之万函数^[19]分析可知, 其折射率会随着外界磁场的变化而发生改变, 而温度对其折射率的影响较小。当温度恒定且外界磁场强度未达到一定程度时, 磁流体的折射率会随着磁场强度发生非线性变化; 当磁场强度达到一定程度时, 磁流体的折射率不会随温度的变化而变化。

在磁流体 LPFG-FBG 传感器中, LPFG 的光耦合是前向传输的纤芯基模与同向传输的各阶包层模的耦合, 其纤芯基模与某一包层模耦合的谐振波长^[20]为

$$\lambda_{\text{LPFG}} = (n_{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^{(p)}) \Lambda_{\text{LPFG}} \quad (1)$$

其中, n_{eff} 、 $n_{\text{cl}}^{(p)}$ 分别为纤芯基模、第 p 阶包层模的有效折射率, Λ_{LPFG} 为 LPFG 的周期。

FBG 的光耦合主要发生在纤芯中, 其谐振波长公式^[21]为

$$\lambda_{\text{FBG}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda_{\text{FBG}} \quad (2)$$

其中, Λ_{FBG} 为 FBG 的周期。

光纤具有热光效应和热膨胀效应, 影响 LPFG、FBG 的周期和有效折射率, 因此它们的谐振波长随外界温度 T 的变化而变化。外界磁场强度 M 发生变化时, 由于 FBG 的光耦合主要发生在纤芯, 其谐振波长大小几乎不改变, 即 FBG 的磁场强度灵敏度等于 0。根据灵敏度矩阵式可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\text{LPFG}(T)} & K_{\text{LPFG}(M)} \\ K_{\text{FBG}(T)} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{LPFG}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, ΔT 、 ΔM 分别为外界温度、磁场的变化值, $K_{\text{FBG}(T)}$ 、 $K_{\text{LPFG}(T)}$ 分别为 FBG、LPFG 的温度灵敏度, $K_{\text{LPFG}(M)}$ 为 LPFG 的磁场强度灵敏度, $\Delta\lambda_{\text{LPFG}}$ 、 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 分别为 LPFG、FBG 谐振波长变化量。由式(3)可知, 磁流体 LPFG-FBG 传感器可同时实现温度和磁场强度的双参量测量。

1.2 传感特性仿真

本文利用 Optigrating 软件对磁流体 LPFG-FBG 传感结构进行仿真分析。

首先, 设置光纤参数: 光纤纤芯直径为 $8.2 \text{ }\mu\text{m}$, 光纤包层直径为 $125 \text{ }\mu\text{m}$, 光纤的热光系数为 7.13×10^{-6} , 光纤的热膨胀系数为 5.5×10^{-7} , 光纤纤芯折射率为 1.468 2, 光纤包层折射率为 1.452 9。

然后, 设置 LPFG-FBG 的结构参数: LPFG 的周期为 $247 \text{ }\mu\text{m}$, 长度为 25 mm , 纤芯折射率调制深度为 1×10^{-3} , 间隔单模光纤长度为 20 mm ; FBG 周期为 535 nm , 长度为 10 mm , 纤芯折射率调制深度为 9×10^{-5} 。

最后, 运行 Optigrating 软件对磁流体 LPFG-FBG 传感器进行温度和折射率传感仿真。仿真结果表明: 随着设置的环境温度从 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $75 \text{ }^\circ\text{C}$, 短波损耗峰谐振波长 λ_1 和长波损耗峰谐振波长 λ_2 都向波长数值变大的方向漂移; 随着设置的环境折射率从 1.33 上升到 1.43, λ_1 基本不随折射率的变化发生漂移, 只有损耗发生微小的变化; λ_2 对环境折射率的变化从缓慢变化到急剧变化, 当环境的折射率越接近光纤包层折射率 1.452 9 时, λ_2 对环境折射率的变化越明显, 因此可以通过减少光纤包层厚度提高传感探头折射率的灵敏度。

1.3 设计与制作

本文以上述仿真结果作为传感结构的设计方向, 制作 LPFG-FBG 传感单元并确定 λ_1 和 λ_2 的大小, 腐蚀部分光纤包层来提高传感器的磁场强度灵敏度。本文使用的传感光纤为康宁公司生产的 SMF-28 光纤。传感器的示意图和实物图如图 1 所示, 其设计与制作过程如下: 首先, 设置 244 nm 倍频氩离子激光器的光功率输出为 80 mW ; 其次, 结合相位掩膜法在光纤纤芯处刻制 LPFG 和 FBG (LPFG、FBG 的中心波长分别为

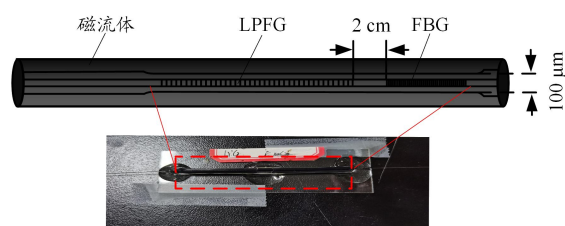
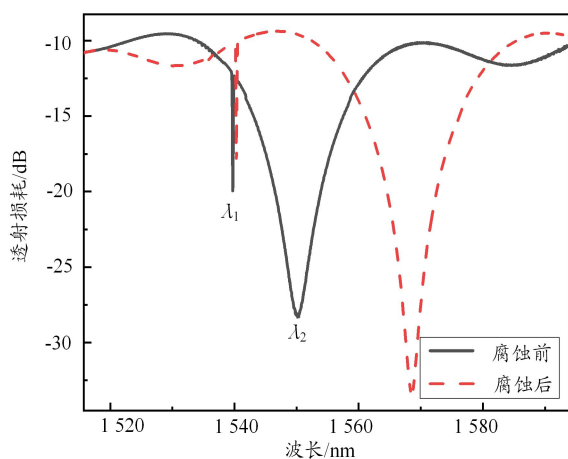


图 1 传感器示意图和实物图

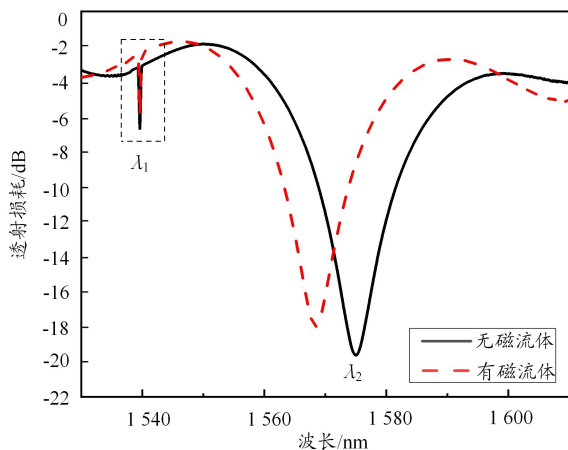
冯森林,王兆香,王谦,等:一种用于同时测量温度和磁场强度的磁流体 LPFG-FBG 传感器

1 550、1 539 nm);然后,通过熔接机将刻有 LPFG 和 FBG 的光纤进行熔接(间隔的单模光纤长度为 2 cm,并保证熔接点无气泡);最后,使用浓度分别为 30% 和 15% 的 HF 溶液腐蚀光纤包层至 100 μm (15%、30% 浓度的 HF 腐蚀速率分别为 0.221 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、0.706 5 $\mu\text{m}/\text{min}$)。

传感器腐蚀前后的谐振波长变化如图 2(a)所示。可以看出,当光纤包层直径变小时(腐蚀后),谐振波长 λ_1 和 λ_2 均向波长数值变大方向移动,其中 λ_2 的变化情况更明显。将腐蚀后的光纤封装于充满磁流体的石英管中(石英管的直径为 0.9 mm,用注射法将磁流体注满石英管并使用 UV 紫外胶进行封装),得到传感器的谐振波长变化如图 2(b)所示。可以看出, λ_1 没有明显变化,而 λ_2 向波长数值变小的方向移动。这种谐振波长的变化情况均是由于光纤包层的有效折射率发生变化而引起的,且变化情况与仿真结果一致(2 种谐振波长对光纤包层有效折射率敏感度不一致),符合预期设想并以此设计实验进行验证。



(a) 腐蚀包层前后透射光谱图



(b) 填充磁流体前后透射光谱图

图 2 腐蚀并填充磁流体的 LPFG-FBG 谐振波长变化图

2 实验与分析

2.1 实验环境

温度、磁场强度特性实验系统如图 3 所示。实验系统由放大自发辐射(ASE)光源、光纤跳线、温控平台、磁场发生装置、高斯计、光谱仪和计算机组成。系统工作原理如下:首先,ASE 光源发出的光经过光纤跳线射入所设计的 LPFG-FBG 传感结构后射出透射光,光谱仪显示透射光谱图;然后,把光谱图数据导入计算机,使用 Origin 软件进行绘图。其中,温控平台、磁场发生装置可以分别改变环境温度、环境磁场强度。由于本文所设计的磁场特性实验需磁场强度均匀分布,因此实验时需将 2 块永磁体相对平行放置,并在 2 块永磁体中心连线处进行磁场强度测量实验。本文设计的磁场发生装置结构如图 4 所示。

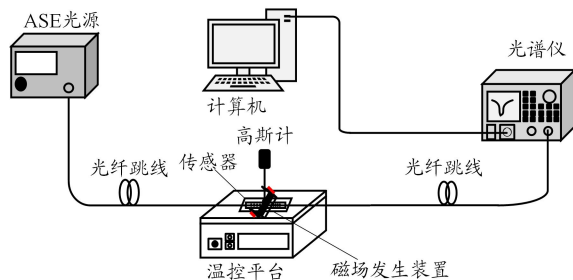


图 3 温度、磁场强度特性实验系统

2.2 温度实验结果

在进行温度实验时,保持温度为 35~85 $^{\circ}\text{C}$,每隔 10 $^{\circ}\text{C}$ 进行测量,实验结果如图 5 所示。从图 5(a)、图 5(b)可知,当温度升高时,传感器的 λ_1 、 λ_2 均发生了右移。图 5(c)、图 5(d)分别是 λ_1 、 λ_2 的线性拟合图。可以看出,当温度为 35~85 $^{\circ}\text{C}$ 时, λ_1 、 λ_2 均与温度具有良好的线性关系, λ_1 线性拟合系数 R^2 为 0.984 8,温度灵敏度为 8 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$; λ_2 线性拟合系数 R^2 为 0.989 7,温度灵敏度为 85.7 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 磁场强度实验结果

在进行磁场强度实验时,保持外界温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,并使磁场的方向垂直于传输光前进方向,通过改变 2 块永磁体的间隔,让磁场强度为 0~30 mT,并且每间隔 4 mT 记录一组数据,实验结果如图 6 所示。从图 6(a)可知,当磁场强度增大时,传感器的 λ_2 发生右移;从图 6(b)可知,当磁场强度增大时,传感器的 λ_1 几乎不发生漂移,损耗变化较小;从图 6(c)可知,当磁场强度在 0~4 mT 变化时,磁场强度达到阈值(根据郎之万公式^[19]可得), λ_2 突然增大;当磁场强度为 4~20 mT 时, λ_2 与磁场强度具有线性关系,拟合系数 R^2

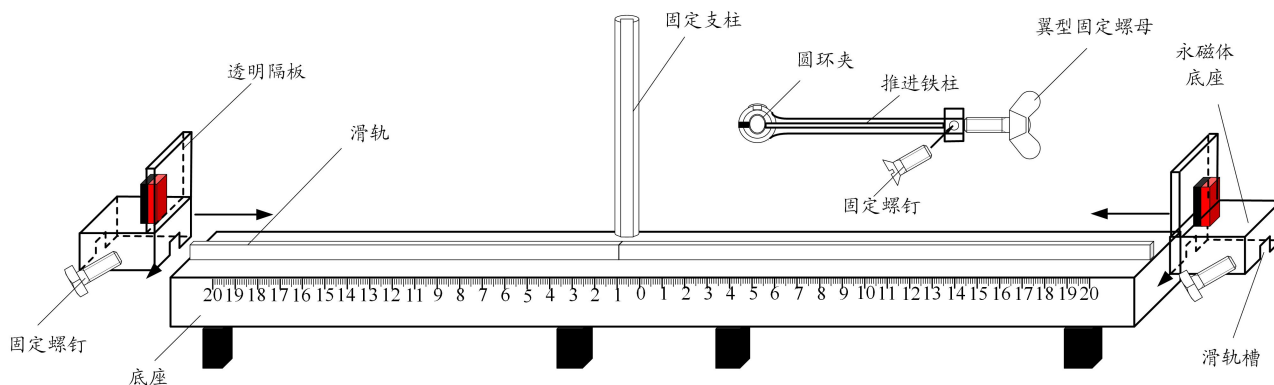
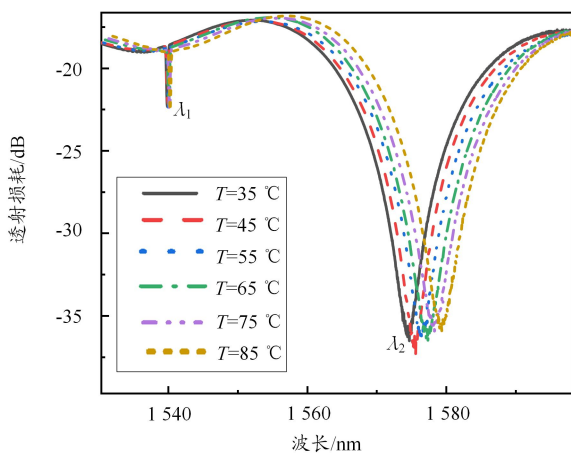


图4 磁场发生装置结构图



(a) 透射光谱图

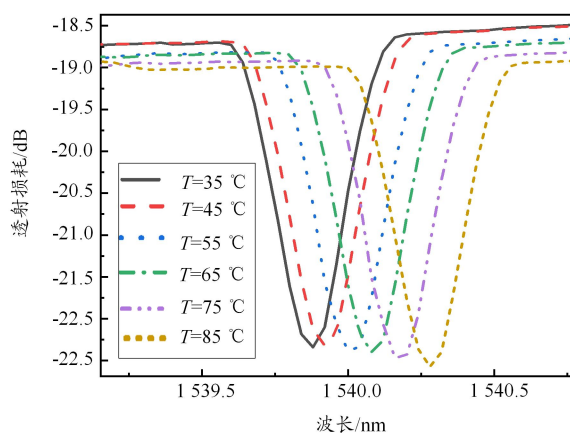
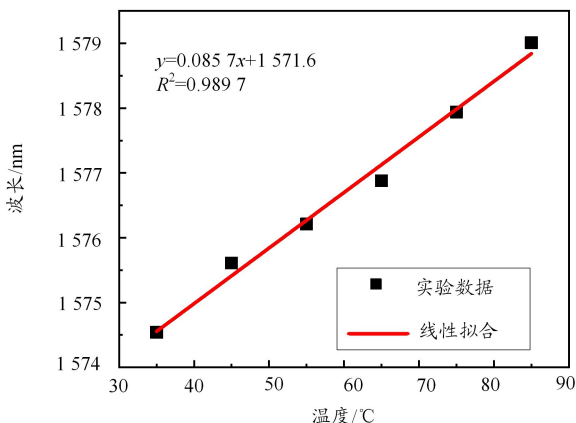
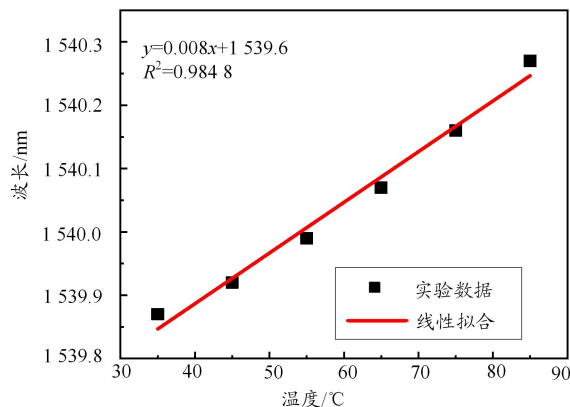
(b) λ_1 的温度实验结果放大图(c) λ_1 的线性拟合图(d) λ_2 的线性拟合图

图5 温度实验结果图

为 0.964 2, 磁场强度灵敏度为 65 pm/mT; 当磁场强度在 20~30 mT 变化时, λ_2 基本不再发生变化, 即磁流体的折射率不再发生变化。

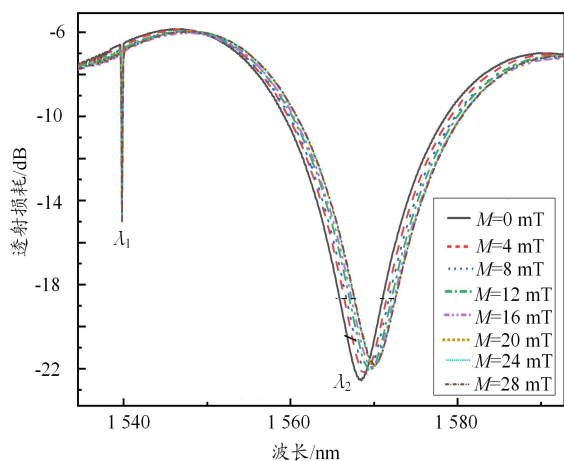
当传感器的环境磁场强度分别为 5、10、15 mT 时, 每间隔 10 min 观察光谱仪的透射光谱图并记录数据。以 λ_2 的波谷点作为参考点, 观察 λ_2 的漂移情况 60 min。实验结果表明, λ_2 分别漂移了 0.1、0.19、0.27 nm。

因此, 本文设计的磁流体 LPFG-FBG 传感器的稳定性良好。

2.4 实验结果分析

将实验所得到的温度灵敏度和磁场强度灵敏度代入灵敏度矩阵式(3)中, 得到式(4), 然后分别求解出 ΔT 、 ΔM 。因此, 本文设计的传感器可以通过 λ_1 和 λ_2 的波长变化情况同时测量外界温度和磁场强度的变

冯森林,王兆香,王谦,等:一种用于同时测量温度和磁场强度的磁流体 LPFG-FBG 传感器



(a) 透射光谱图

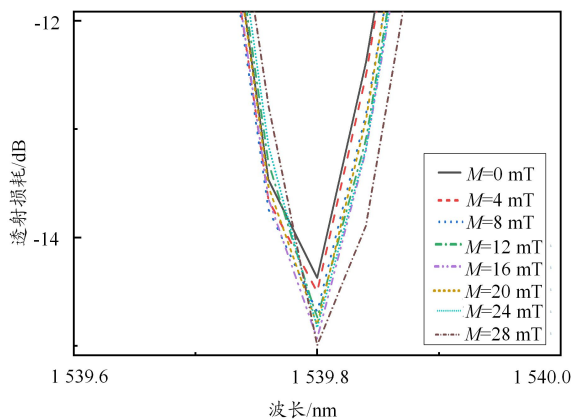
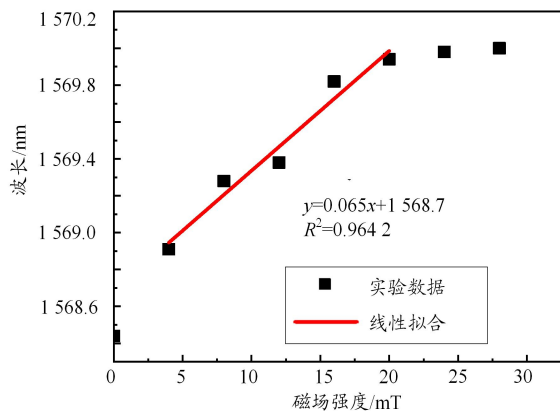
(b) λ_1 的磁场实验结果放大图(c) λ_2 的线性拟合图

图6 磁场强度实验结果图

化情况。

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 85.7 & 65.0 \\ 8.0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_2 \\ \Delta \lambda_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\Delta \lambda_1$ 、 $\Delta \lambda_2$ 分别为 λ_1 、 λ_2 的变化量。

本文对比了几种传感器性能,如表1所示。可以看出,基于电信号的传感器可以实现单一的温度或者

磁场强度的测量,但是基于光信号的传感器均可以实现温度和磁场强度的双参量测量;相对于单一的LPFG或FBG传感器,LPFG与FBG相结合的光纤传感器在灵敏度上有较高的优势;与混并式LPFG、FBG的光纤传感器相比,本文所设计的磁流体LPFG-FBG传感器具有更高的温度和磁场强度灵敏度。

表1 温度磁场传感器性能比较

传感器	信号类型	磁场强度灵敏度/(mV/T)	温度灵敏度/(mV/°C)	参考文献
双极型晶体	电信号	—	11.2	文献[8]
硅磁敏三极	电信号	926	—	文献[10]
薄包层FBG	光信号	34.9	9.2	文献[17]
单LPFG	光信号	25.0	39.3	文献[20]
混并式LPFG、FBG	光信号	52.3	44.9	文献[18]
磁流体LPFG-FBG	光信号	65.0	85.7	本文

3 结束语

本文设计了一种具有较高温度灵敏度和磁场强度灵敏度的光纤温度磁场传感器,以磁流体作为磁性敏感材料,LPFG级联FBG作为传感单元,再通过腐蚀传感器的光纤包层以提高灵敏度,不仅可以测量环境的温度变化,还可以测量磁场强度的变化情况。通过仿真与实验,得到该传感器在温度为35~85℃时其温度灵敏度为85.7 pm/°C;在磁场强度为4~20 mT时,磁场强度灵敏度为65 pm/mT。综上所述,本文设计的磁流体LPFG-FBG传感器具有体积小、灵敏度高、稳定性好、耐腐蚀、抗电磁干扰能力强和可实现双参量同时测量等优点,可以应用在集成度较高的电路系统、环境酸碱度较高的矿井中。

参考文献:

- [1] 苑立娟,刘仲鹏.船舶密闭舱室温度远程监测技术[J].舰船科学技术,2021,43(10A):157-159.
- [2] 齐立萍,王栋轩,王静一.传感器在智能手机中的应用及发展趋势[J].科技视界,2018,56(3):140-141.
- [3] 双雅,李力,王卓,等.基于超表面的智能电磁感知:理论、系统与实验[J].电波科学学报,2021,36(6):858-866.
- [4] 朱宇洁,郭晓东,宋佳玲.脉冲磁场传感器的设计与灵敏度修正方法[J].中国测试,2019,45(3):114-120.
- [5] RIZWAN U, SAGAR M, ZHANG X H. Facile magnetoresistance ad-

- justment of graphene foam for magnetic sensor applications through microstructure tailoring[J]. Nano Materials Science, 2020, 2(4): 346–352.
- [6] 门阔,赵鸿滨,魏峰,等. 磁性传感材料与器件研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(15): 15056–15064.
- [7] 刘卓元,宋旭彤,孙云娜,等. 基于电桥式氢气敏感探头的温控系统设计[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(10): 67–70.
- [8] 阳佳丽,赵新,高博,等. 基于双极型晶体管的温度传感器[J]. 电子与封装, 2022, 22(9): 41–45.
- [9] 路道,李浩榛,刘刚,等. 纳米银柔性农用温度传感芯片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 198–205.
- [10] 赵晓锋,宋灿,柳微微,等. 基于聚磁结构磁场传感器特性研究(英文)[J]. 黑龙江大学工程学报, 2020, 11(4): 52–60.
- [11] 颜肖平,梁华庆,王志博,等. 井下高温高精度磁场随钻测量系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 88–91.
- [12] FANG Y, HE W, ZHANG W, et al. All-fiber temperature and refractive index sensor based on a cascaded tilted Bragg grating and a Bragg grating[J]. Journal of Optical Technology C/c of Opticheskii Zhurnal, 2021, 88(2): 100–105.
- [13] KIM D K, LEE S L, CHOI S, et al. Bend-insensitive simultaneous measurement of strain and temperature based on cascaded long-period fiber gratings inscribed on a polarization maintaining photonic crystal fiber[J]. Journal-Korean Physical Society, 2020, 76(9): 810–818.
- [14] WANG J, XU Q, RUI R W. Temperature-compensated single-ended twist sensor based on cascaded fiber grating [J]. Optical Engineering, 2020, 59(9): 1–11.
- [15] ZHANG Y, PU S, LI Y, et al. Magnetic field and temperature dual-parameter sensor based on nonadiabatic tapered microfiber cascaded with FBG[J]. IEEE Access, 2022(10): 78–86.
- [16] CHEN Y F, HAN Q, YAN W C, et al. Magnetic field and temperature sensing based on a macro bending fiber structure and an FBG[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(21): 7659–7662.
- [17] 梁星,杨武海,刘鑫. 磁流体包覆薄包层光纤光栅磁场传感研究[J]. 压电与声光, 2019, 41(1): 34–39.
- [18] 吴磊,葛海波,张杰,等. 基于磁流体与混并式 LPFG 磁场传感器的研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(6): 50–52.
- [19] WU D, ZHAO Y, LV R, et al. Analysis of tunable refractive index characteristics of the magnetic fluid [J]. Journal of Northeastern University, 2014 35(7): 931–934.
- [20] 蔺际超. 基于磁流体包覆复合光纤光栅的磁场传感器研究 [D]. 天津:天津理工大学, 2015.
- [21] BAI X, HU M, GANG T, et al. Simultaneous acoustic and magnetic measurement using cascaded fiber Bragg grating[J]. Optical Fiber Technology, 2018 45(12): 376–382.