

## 基于磁流体结构的光纤温度与磁场传感器

刘婷, 温芳芳, 张静, 李永倩

### Temperature and magnetic field optical fiber sensor based on magnetic fluid structure

引用本文:

刘婷,温芳芳,张静,李永倩. 基于磁流体结构的光纤温度与磁场传感器[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 520–526.

LIU Ting,WEN Fangfang,ZHANG Jing,LI Yongqian. Temperature and magnetic field optical fiber sensor based on magnetic fluid structure[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(4): 520–526.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 41–45.

### 2. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响

引用本文: 陈强华, 丁锦红, 韩文远, 等. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 329–334.

### 3. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感

引用本文: 宁贵毅, 傅贵, 史萌, 等. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 916–920.

### 4. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统

引用本文: 王伟, 张天阳, 陈海滨, 等. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 849–853.

### 5. 表面曲率对石英毛细管微瓶模式及传感特性影响

引用本文: 张峰, 吴根柱, 汪成程. 表面曲率对石英毛细管微瓶模式及传感特性影响[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 840–844.

文章编号: 1001-3806(2023)04-0520-07

## 基于磁流体结构的光纤温度与磁场传感器

刘婷<sup>1,2,3</sup>, 温芳芳<sup>1,2,3</sup>, 张静<sup>1,2,3</sup>, 李永倩<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 华北电力大学 电子与通信工程系, 保定 071003; 2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 保定 071003; 3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 保定 071003)

**摘要:** 为了实现磁场和温度的同时测量, 实验制作了基于球形-细芯-球形传感结构的马赫-曾德尔干涉仪。采用将磁流体作为外环境包覆传感结构的方法, 进行了双参量的传感研究。外界磁场和温度改变时, 磁流体的折射率有规律地变化, 可以同时测量磁场和温度, 但因消光比差, 故在此基础上改良设计了一种球形-多模-细芯-球形传感结构。结果表明, 单峰解调方式得到的球形-细芯-球形传感结构的磁场和温度灵敏度分别为 $-0.0967\text{ nm/mT}$ 和 $0.0667\text{ nm/}^\circ\text{C}$ ; 改良之后的球形-多模-细芯-球形结构干涉效果好, 且磁场和温度灵敏度分别为 $0.1267\text{ nm/mT}$ 和 $-0.1213\text{ nm/}^\circ\text{C}$ , 具有低成本、高灵敏度、抗噪、应用性好等特点。该研究可为磁场和温度双参量传感设计提供参考。

**关键词:** 光纤光学; 光纤传感; 磁流体; 双参量测量

中图分类号: TN253 文献标志码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.04.012

## Temperature and magnetic field optical fiber sensor based on magnetic fluid structure

LIU Ting<sup>1,2,3</sup>, WEN Fangfang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2,3</sup>, LI Yongqian<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** In order to realize the simultaneous measurement of magnetic field and temperature, a Mach-Zehnder interferometer based on sphere-thin core fiber-sphere sensing structure was fabricated. The double parameter sensing was studied by using magnetic fluid as the sensing structure external environment. When the external magnetic field and temperature change, the refractive index of magnetic fluid changes regularly, and the magnetic field and temperature can be measured at the same time. But the extinction ratio of the structure is poor, so a spherical-multi mode fiber-thin core fiber-sphere sensor structure is improved. The results show that the magnetic field and temperature sensitivity of the sphere-thin core fiber-sphere sensing structure obtained by single-peak demodulation are  $-0.0967\text{ nm/mT}$  and  $0.0667\text{ nm/}^\circ\text{C}$ , respectively. The improved sphere-multi mode fiber-thin core fiber-sphere structure has a good interference effect, and the magnetic field and temperature sensitivity are  $0.1267\text{ nm/mT}$  and  $-0.1213\text{ nm/}^\circ\text{C}$ , respectively. It has the characteristics of low cost, high sensitivity, noise resistance and good application. The research can provide reference for the design of magnetic field and temperature double parameter sensor.

**Key words:** fiber optics; optical fiber sensing; magnetic fluids; two-parameter measurement

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775057; 62171185; 52177141); 河北省自然科学基金资助项目(F2019502112); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2019MS086; 2021MS071)

作者简介: 刘婷(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信与光传感技术。

\* 通讯联系人。E-mail: liyq@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-22; 收到修改稿日期: 2022-07-14

## 引言

磁场与温度的测量在化学工业、海洋监测、电力系统等领域有举足轻重的地位。光纤传感器具有结构紧凑、灵敏度高、功耗低等优良特性, 若结合磁敏材料或温敏材料, 则可以把外界环境的磁场和温度的改变, 转化为光纤中可以监测到的相位、幅度等参量的变化, 从而达到测量的目的。具有多功能磁光特性的磁流体是

最合适的选择。

在没有外界环境影响时,磁流体中的磁性纳米颗粒随机分布在基液中。当磁场或温度变化时,磁性纳米颗粒就会重新排布,从而影响磁流体折射率。最近几年,学者们利用磁流体折射率对温度和磁场响应的特性,使磁流体包覆倾斜光栅<sup>[1]</sup>、腐蚀的细芯光纤<sup>[2]</sup>、无芯光纤<sup>[3]</sup>、D型光纤<sup>[4]</sup>等传感结构,或者将磁流体填充于光子光纤空气孔<sup>[5]</sup>、F-P传感腔<sup>[6]</sup>等方式,使得在磁场和温度的作用下,磁流体的折射率变化引起光纤中传输光束的相位、幅度等相应参数发生改变,从而实现对外界温度和磁场的测量<sup>[7]</sup>。这些磁场与温度传感器虽然获得了较高的灵敏度,但制作成本高,且存在一定的危险性和复杂性。

本文中制作了一种球形-细芯-球形(sphere-thin core fiber-sphere, STS)结构的传感器并由磁流体包覆,实现了磁场与温度的同时测量,灵敏度为 $-0.0967 \text{ nm/mT}$ 和 $0.0667 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ,但由于该传感器的透射光谱消光比较差,不利于传感器的解调。本文作者改良设计了一个磁流体包覆球形-多模-细芯-球形(sphere-multi mode fiber-thin core fiber-sphere, SMTS)的传感器,该传感结构在第1个球形结构处增加了一段多模光纤,充分激发细芯光纤中的高阶模,增加在细芯光纤包层中传输光的能量,增强传感器的消光比,提高了传感器的抗噪性能。在实际运用中,该磁流体包覆的球形-多模-细芯-球形传感器制作简单、成本低、且灵敏度较高,在温度与磁场同时测量领域具有可观的应用前景。

## 1 传感原理

基于磁流体包覆的干涉型光纤传感器,通常通过不同光纤拼接、拉锥、放电熔接等方式,制成模式失配节点。光束经过这一节点时,一部分光进入到光纤的包层中传输,剩余光继续在纤芯中传输,然后于另一模式失配节点耦合进入输出光纤纤芯中传输。在纤芯和包层传输的光束经过传感光纤后产生相位差,发生干涉后输出。输出光的光强可表示为<sup>[8]</sup>:

$$I = I_{\text{core}} + \sum_m I_{\text{cladding},m} + \sum_m 2\sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding},m}} \cos\varphi \quad (1)$$

式中, $I_{\text{core}}$ 是纤芯基模的光强; $I_{\text{cladding},m}$ 是 $m$ 阶包层模的光强; $\varphi$ 为二者的相位差,可表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \quad (2)$$

式中, $L$ 是传感光纤长度; $\lambda$ 是光波长; $\Delta n_{\text{eff}}$ 是纤芯模和包层模的有效折射率差。当 $\varphi = (2m+1)\pi$ 时, $m$ 为

整数,干涉光强最小,此时波长可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1} \quad (3)$$

干涉仪的光谱可以通过自由光谱范围、消光比等参量进行评价。自由光谱范围可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta\nu = \lambda_{m-1} - \lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m-1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1} = \frac{4\Delta n_{\text{eff}}L}{(2m-1)(2m+1)} \approx \frac{\lambda_m^2}{\Delta n_{\text{eff}}L} \quad (4)$$

由上式可以看出,有效折射率差、干涉长度和波长可以影响自由光谱范围。

定义光谱的消光比 $R$ 为<sup>[11]</sup>:

$$R = 10\lg \left( \frac{1 + \sqrt{\frac{I_{\text{cladding}}}{I_{\text{core}}}}}{1 - \sqrt{\frac{I_{\text{cladding}}}{I_{\text{core}}}}} \right), (I_{\text{core}} > I_{\text{cladding}}) \quad (5)$$

由(5)式可知, $I_{\text{cladding}}/I_{\text{core}}$ 的值越接近1,即纤芯与包层模中的能量差越小,消光比越大,干涉效果越明显。

该传感器中传感结构由磁流体包覆,在外界温度与磁场的影响下,磁流体的磁性纳米粒子的运动状态改变,所以其折射率发生改变<sup>[12]</sup>,从而影响光纤包层的折射率,使 $\Delta n_{\text{eff}}$ 改变。由(2)式和(3)式可知,该传感器透射光谱的幅度和波长发生偏移。因此,通过监测透射光谱某单一特征波谷的波长和幅度的偏移量,建立敏感矩阵,即可实现温度与磁场的变化。当磁场与温度的变化量分别为 $\Delta H$ 和 $\Delta T$ 时,该敏感矩阵可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $\Delta\lambda$ 和 $\Delta I$ 分别为该特征波谷的波长和幅度偏移量; $K_1$ 和 $K_3$ 分别表示在磁场作用下,该特征波谷波长和幅度的灵敏度; $K_2$ 和 $K_4$ 分别表示在温度的作用下,该特征波谷波长和幅度的灵敏度,其中 $K_1 \cdot K_4 \neq K_2 \cdot K_3$ 。在实际应用中,仅监测单个特征波谷的波长和幅度变化量,即可获得外界温度和磁场的变化量。

## 2 实验与讨论

### 2.1 STS传感结构的温度与磁场响应

2.1.1 传感结构 该磁流体包覆的球形-细芯-球形温度与磁场双参量传感结构如图1a所示,其中球形是光纤熔接机在单模光纤(single mode fiber, SMF)末端

多次放电制成的,其直径为  $176\ \mu\text{m}$ ,显微镜实物图如图 1b 所示,在两个球形之间连接一段长  $15\ \text{mm}$  的细芯光纤(thin core fiber, TCF)组成马赫-曾德尔干涉仪,其中细芯光纤的纤芯与包层直径分别为  $6\ \mu\text{m}/80\ \mu\text{m}$ 。将传感结构封装于玻璃毛细管中,并使磁流体均匀充分地包覆于传感结构表面。

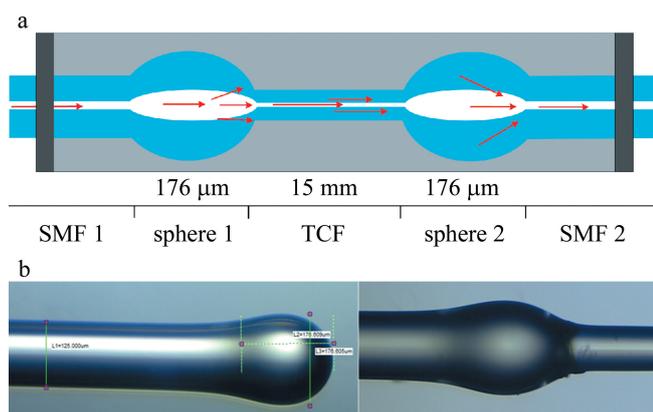


图 1 STS 传感结构图

a—传感结构示意图 b—球形节点的电镜图

Fig. 1 STS sensor structure diagram

a—schematic diagram of sensor structure b—electron microscopic view of the spherical node

光源发出光束,经入射光纤传输到球形结构时,激发出高阶模,一部分光进入到细芯光纤包层中传输,剩余光束继续在纤芯中传输,两束光在第 2 个球形产生干涉,耦合进入出射光纤<sup>[14]</sup>。

该传感器在空气和在磁流体(magnetic fluid, MF)包覆环境下的透射光谱如图 2 所示。可以看出,加磁流体包覆之后,透射光谱蓝移,这是因为与空气相比,磁流体的折射率较大,此时包层折射率较大,则  $\Delta n_{\text{eff}}$  较小,由(3)式可知,波长蓝移。从图 2 可知,当外界环境是磁流体时,透射光谱的功率下降,干涉效果减弱,这是由于细芯光纤的直径小于球形结构,球形结构中部分高阶模式的光在传输时耦合进入外界环境中,

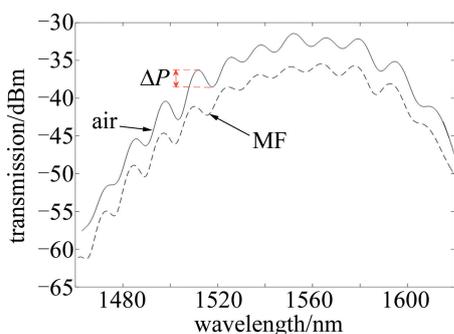


图 2 STS 传感结构在空气和磁流体环境下的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of the STS sensing structure in air and magneto-fluid environments

高阶模式的光在传输过程被磁流体颗粒散射、折射或吸收,导致耦合回纤芯的高阶模式光能量减小,干涉谱的光功率下降,干涉效果弱<sup>[15-16]</sup>。

定义  $\Delta P$  为透射谱中特征波谷与前一个波峰的光强差:

$$\Delta P = I_{\max,\lambda} - I_{\min,\lambda} \quad (7)$$

式中,  $I_{\max,\lambda}$  为特征波谷前一个波峰的光强;  $I_{\min,\lambda}$  为特征波谷处的光强。  $\Delta P$  是传感器透射光谱的干涉效果的直观表现,干涉效果好的透射谱具有较强的抗噪性能。

2.1.2 STS 传感器的磁场与温度响应 磁场传感系统如图 3 所示。实验时温度保持为室温状态,采用超辐射发光二极管(super-luminescent emitting diode, SLED)宽谱光源,将传感器固定,使用两块永久磁铁,磁场强度由特斯拉计测量,光谱仪用来记录透射谱。

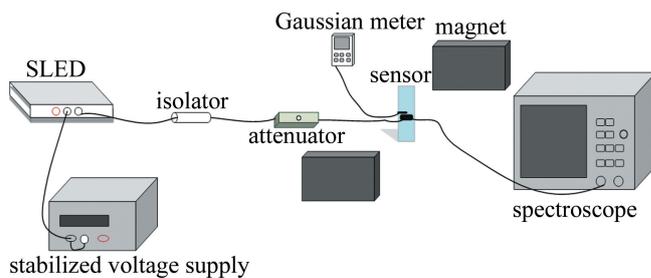


图 3 磁场传感系统

Fig. 3 Magnetic field sensing system

图 4a 为该结构  $1514\ \text{nm}$  处特征波长在不同磁场下的透射谱。随着磁场增加,波长蓝移,特征波长的幅度增加。当外加磁场改变时,结构外包覆的磁流体折射率增大<sup>[17]</sup>,光纤包层折射率相应增加,光束的相位差减小,由(3)式可知,特征波长蓝移。特征波长处的波长和幅度与磁场的关系如图 4b 所示。随着磁场强度增大,特征波长处的幅度增大,波长蓝移,在  $0\ \text{mT} \sim 20\ \text{mT}$  的范围内,幅度增加  $0.4393\ \text{dB}$ ,波长偏移了  $1.5120\ \text{nm}$ 。当磁场上升到  $20\ \text{mT}$  之后,波长不再发生明显变化,这是因为磁流体此时已经处于磁饱和状态,折射率不再发生改变。通过数据拟合可知,在  $1514\ \text{nm}$  处的波长磁场灵敏度分别为  $-0.0967\ \text{nm/mT}$ 、 $0.0022\ \text{dB/mT}$ 。

在温度响应实验中,将 STS 传感器置于恒温水槽,每隔  $5\ \text{min}$  记录一次数据。该传感结构  $1514\ \text{nm}$  处特征波长在不同温度下的透射谱如图 5a 所示,随着温度增加,波长红移,特征波谷的幅度逐渐增加。这是因为温度增加,磁流体的折射率减小<sup>[18]</sup>,光束的相位差增大,特征波长红移。特征波长处的波长和幅度与温度

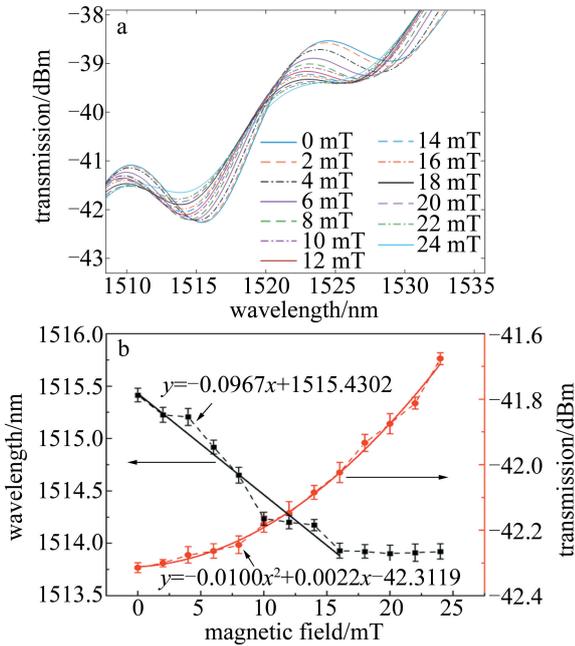


图 4 STS 的磁场传感特性

a—不同磁场的透射谱 b—特征波长的波长漂移量/幅度与磁场的关系

Fig. 4 Magnetic field sensing characteristics of the STS

a—transmission spectra with different magnetic fields b—the measured wavelength shift/amplitude of the transmission dip versus magnetic field

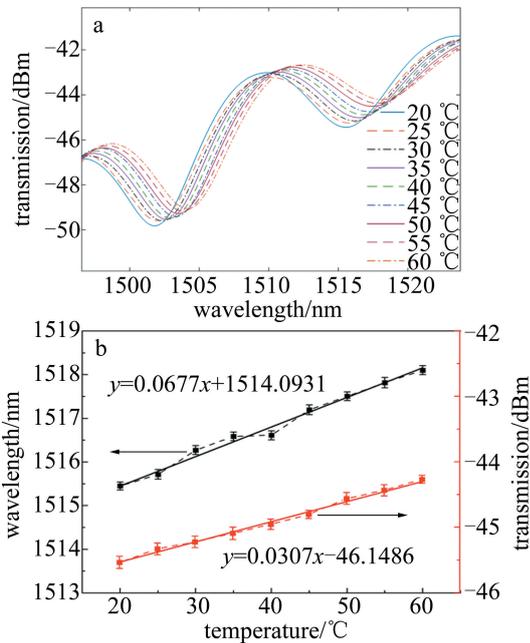


图 5 STS 的温度传感特性

a—不同温度的透射谱 b—特征波长的波长漂移量/幅度与温度的关系

Fig. 5 Temperature sensing characteristics of the STS

a—transmission spectra with different temperatures b—the measured wavelength shift/amplitude of the transmission dip versus temperature

的关系如图 5b 所示,温度灵敏度分别为 0.0677 nm/°C、0.0307 dB/°C。

由图 4a 可知,在施加 24 mT 的磁场时,特征波谷

对应的峰值与谷值之差  $\Delta P$  仅为 0.2232 dB。随着磁场与温度的增加,该传感结构透射光谱的幅度都呈单调增加趋势,且在 1514 nm 处的  $\Delta P$  呈下降趋势,如图 6 所示。该传感器采用单峰解调方式,透射谱的消光比低,易受噪声影响,测量范围受限。因此,需要改良设计一个干涉效果明显、具有抗噪性能的磁场传感器。

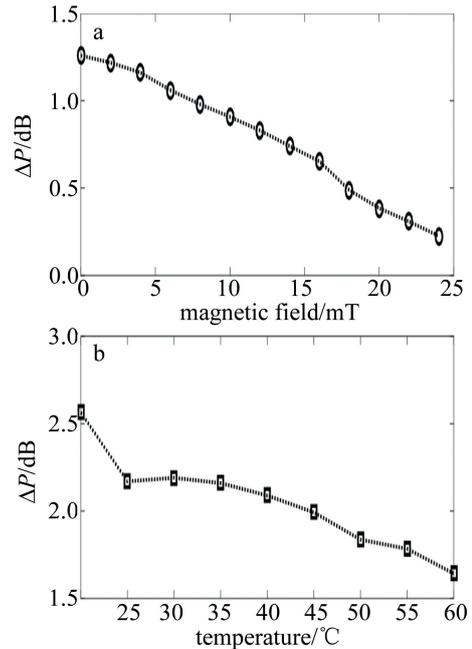


图 6 a— $\Delta P$  和磁场关系图 b— $\Delta P$  和温度关系图

Fig. 6 a—diagram of  $\Delta P$  and magnetic field b—diagram of  $\Delta P$  and temperature

### 2.2 SMTS 传感结构的温度与磁场响应

2.2.1 传感结构 前面制作的 STS 传感结构是由球形结构和细芯光纤直接熔接,不存在偏芯,因此球形结构是激发高阶模的关键,由上述的实验分析可知,该传感器的干涉效果不明显,只利用球形结构来激发高阶模不够充分。因此改良设计了一种球形-多模-细芯-球形的传感结构,如图 7 所示。该传感器在 STS 传感器的基础上,在第 1 个球形结构后增加了一段长 1 mm、纤芯与包层直径分别为 105  $\mu\text{m}$  / 125  $\mu\text{m}$  的多模光纤 (multi-mode fiber, MMF)。增加这段多模光纤可以使包层模能量增大,进而增强透射谱的干涉效果。

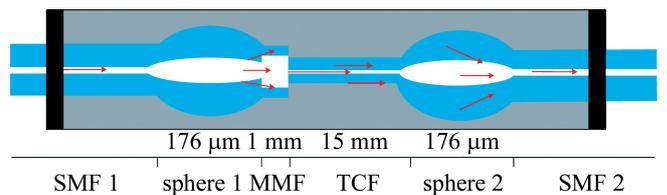


图 7 SMTS 传感结构

Fig. 7 Sensing structure of the SMTS

由图 8 可以看出,SMTS 传感结构透射谱的特征波

谷与 STS 传感结构对应,两传感结构在 1475 nm ~ 1600 nm 波长范围内的自由光谱范围 (free spectrum range, FSR) 如图 9a 所示。可知增加一段多模光纤不改变传感结构的自由光谱范围,但透射谱的消光比明显大于 STS 传感结构,其相应特征波谷输出峰值与谷值之差  $\Delta P$  的关系如图 9b 所示。SMTS 传感结构各特征波谷的  $\Delta P$  均在 6.4 dB 以上,而 STS 传感结构的  $\Delta P$  均值小于 2 dB, 1540 nm 附近的波谷  $\Delta P$  不及 1 dB, 抗噪性能弱。随着温度与磁场的增加,输出透射谱的幅度逐渐增加,消光比较弱的波谷存在波谷消逝的风险,不支持幅度解调或双波长解调方式。在 STS 结构上增加一段多模光纤,多模光纤的纤芯直径大于球形结构和细芯光纤的纤芯直径,光束进入球形结构和多模光纤,可以激发出更多的高阶模,更多光进入包

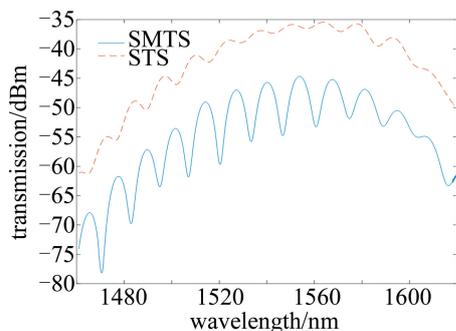


图 8 STS 与 SMTS 传感结构的透射谱

Fig. 8 Transmission spectra of the STS and the SMTS sensing structures

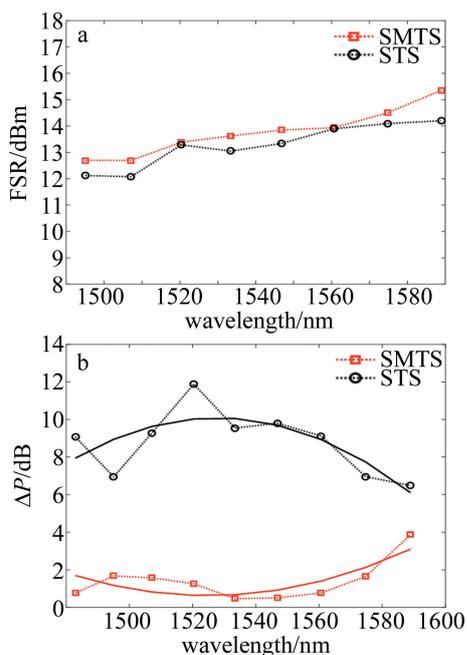


图 9 STS 和 SMTS 结构的光谱相关参数随波长的变化

Fig. 9 Spectral correlation parameters of the STS and the SMTS structures vary with wavelength

层中传输,包层中的能量增加,消光比增大。将 STS 和 SMTS 传感结构的透射谱进行傅里叶变换,得到的空间频谱如图 10 所示。在空间频率为 0 的峰值表示基模的振幅峰,STS 和 SMTS 传感结构除了基模振幅峰外,都存在包层模振幅的峰。STS 结构透射谱中存在  $0.0572 \text{ nm}^{-1}$ 、 $0.0715 \text{ nm}^{-1}$  频率的干涉模式,而 SMTS 结构透射谱中存在  $0.0715 \text{ nm}^{-1}$ 、 $0.0780 \text{ nm}^{-1}$ 、 $0.1286 \text{ nm}^{-1}$ 、 $0.1501 \text{ nm}^{-1}$ 、 $0.1572 \text{ nm}^{-1}$  频率的主干涉模式,SMTS 传感结构激发了更多的包层模,证实了上述情况。SMTS 传感结构的透射谱具有较好的消光比,很好地解决了波谷消逝问题,具有抗噪功能,且可用于解调的特征波谷较多,可支持多种解调方式,在实际应用中具有很好的复用性。

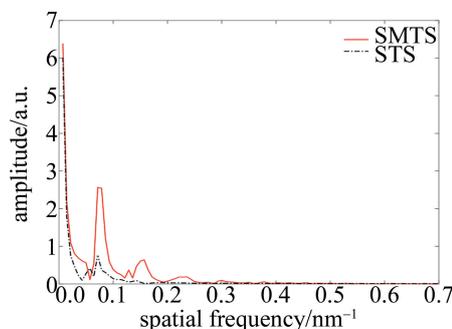


图 10 STS 和 SMTS 传感结构的空间频谱

Fig. 10 Spatial spectrum of the STS and the SMTS sensing structures

2.2.2 SMTS 传感器的磁场与温度响应 由于 SMTS 与 STS 的自由光谱范围相同,选择波长 1520 nm 处的波谷作为特征波谷。SMTS 传感结构在 0 mT ~ 24 mT 磁场范围内的磁场响应如图 11a 所示。随着磁场增大,波长蓝移,特征波谷的幅度增加。特征波谷的变化趋势与 STS 传感器相同,其波长和幅度与磁场的关系如图 11b 所示,在 1520 nm 处的磁场灵敏度分别为  $-0.0601 \text{ nm/mT}$ 、 $0.2237 \text{ dB/mT}$ 。

SMTS 传感器的温度响应如图 12a 所示。随着温度的增加,波长红移,特征波谷的幅度变化小,其波长和幅度与磁场的关系如图 12b 所示。在 1520 nm 处的温度灵敏度分别为  $0.0505 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 、 $-0.0127 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ 。

在实际应用中,将 SMTS 传感器在磁场和温度情况下分别得到的波长响应灵敏度和幅度响应灵敏度代入(6)式,可建立敏感矩阵:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0601 & 0.0505 \\ 0.2237 & -0.0127 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (8)$$

将实验中获得波长和幅度变化量代入矩阵(8)式,得到磁场与温度的变化量,即可同时测量磁场和温度。SMTS 传感器具有很好的干涉效果,存在多个可

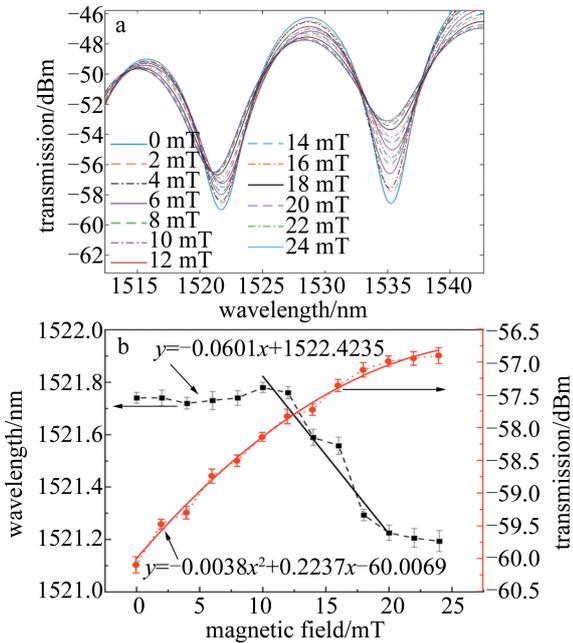


图 11 SMTS 的磁场传感特性

a—不同磁场的透射谱 b—特征波长的波长漂移量/幅度与磁场的关系

Fig. 11 Magnetic field sensing characteristics of the SMTS

a—transmission spectra with different magnetic fields b—the measured wavelength shift/amplitude of the transmission dip versus magnetic field

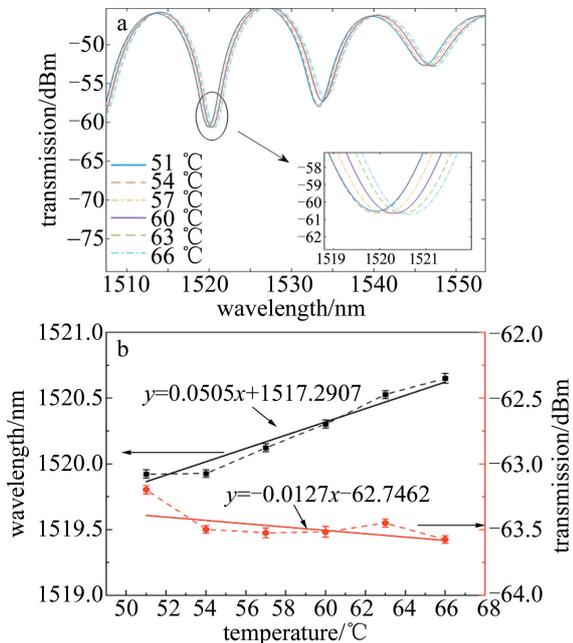


图 12 SMTS 的温度传感特性

a—不同温度的透射谱 b—特征波长的波长漂移量/幅度与温度的关系

Fig. 12 Temperature sensing characteristics of the SMTS

a—transmission spectra with different temperatures b—the measured wavelength shift/amplitude of the transmission dip versus temperature

利用的特征波谷。虽然在 1520 nm 特征波长处,其温度与磁场灵敏度小于 STS 传感器相对应特征波长的温度与磁场灵敏度,但 SMTS 传感器在特征波长为

1565 nm 或 1575 nm 处的灵敏度高于 STS 传感器,如特征波长为 1575 nm 时,SMTS 传感器的波长和幅度与磁场的关系如图 13a 所示。由数据拟合可知,磁场灵敏度为 0.1267 nm/mT。1575 nm 特征波谷处的温度响应情况如图 13b 所示,其温度灵敏度为 -0.1213 nm/°C。相比于其它基于磁流体的磁场传感器,如 LI 等人<sup>[19]</sup>设计的单模-无芯-单模传感结构具有 0.0774 nm/mT; WANG 等人<sup>[20]</sup>设计的单模-多模-单模-球形传感结构具有 0.0470 nm/mT 的磁场灵敏度,本文作者所设计传感器的结构稳固、成本低、磁场灵敏度高、线性度好,有较好的应用前景。

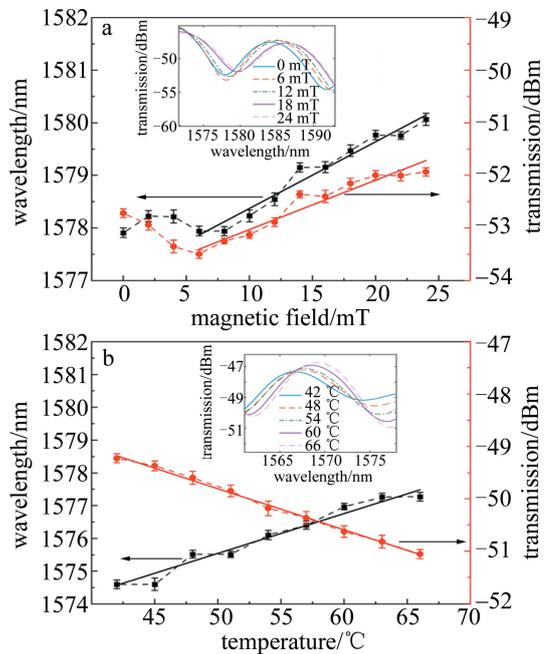


图 13 1575 nm 处波长传感特性

Fig. 13 Sensing characteristics of the wavelength at 1575 nm

### 3 结 论

实验制作了基于磁流体和球形结构的两种温度与磁场传感器,球形-细芯-球形传感器结构稳固、制作简单,但输出透射谱的干涉效果差,随着磁场与温度的增加,特征波谷存在消逝的风险,测量范围受限,存在一定的测量误差。因此,改良设计了球形-多模-细芯-球形传感结构,利用多模光纤充分激发高阶模,增加包层模中的能量,该传感器透射谱的消光比有明显的增强,解决了特征波谷随磁场与温度增加而消逝的风险问题,具有较好的抗噪性能,且 SMTS 传感器存在多个可利用的特征波谷,可支持多种解调方式,复用性好、灵敏度高,在温度与磁场双测量领域有可观的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] ZHENG J, DONG X Y, ZU P, *et al.* Magnetic field sensor using tilted fiber grating interacting with magnetic fluid[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17863-17868.
- [2] YAN G F, ZHANG L, HE S L. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on an etched TCFMI cascaded with an FBG[J]. *Optics Communications*, 2016, 364: 150-157.
- [3] LI Ch, NING T G, WEN X D, *et al.* Magnetic field and temperature sensor based on a no-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 72: 104-107.
- [4] DONG Y, WU B L, WANG M G, *et al.* Magnetic field and temperature sensor based on D-shaped fiber modal interferometer and magnetic fluid[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 107: 169-173.
- [5] ZHAO Y, ZHANG Y N, LV R Q. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on magnetic fluid-infiltrated photonic crystal cavity[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(4): 1055-1062.
- [6] ZHAO Y, LV 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.
- [7] NING G Y, FU G, SHI M, *et al.* Fabrication of optical fiber U-shaped microstructure by femtosecond laser and its application in refractive index sensing[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6): 916-920(in Chinese).  
宁贵毅, 傅贵, 史萌, 等. 飞秒激光制备光纤U形微结构应用于折射率传感[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 916-920.
- [8] LV R Q, ZHAO Y, WANG D, *et al.* Magnetic fluid-filled optical fiber Fabry-Perot sensor for magnetic field measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(3): 217-219.
- [9] QUE R Y, LIU Y, SUN H H, *et al.* Refractive index sensor based on F-P interferometer cavity in optical fiber with double-openings[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 780-784(in Chinese).  
阙如月, 刘一, 孙慧慧, 等. 基于光纤内双开口F-P干涉腔的折射率传感器[J]. *激光技术*, 2014, 38(6): 780-784.
- [10] ZHOU G L, E Sh L, DENG W Y. Optical fiber temperature sensors based on bending loss[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 46-49(in Chinese).
- [11] 周广丽, 鄂书林, 邓文渊. 基于弯曲损耗的光纤温度传感器[J]. *激光技术*, 2009, 33(1): 46-49.
- [12] CHEN J P. Study of optical fiber sensors based on Mach-Zehnder interference[D]. Ningbo: Ningbo University, 2014: 9-40(in Chinese).  
陈金平. 基于Mach-Zehnder干涉的光纤传感器的特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014: 9-40.
- [13] RUAN Z L, PEI L, NING T G, *et al.* Simple structure of tapered FBG filled with magnetic fluid to realize magnetic field sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 67: 102698.
- [14] 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.
- [15] SHI F Q, LUO Y, CHE J J, *et al.* Optical fiber F-P magnetic field sensor based on magnetostrictive effect of magnetic fluid[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 43: 35-40.
- [16] HONG C Y, YANG S Y, HORNG H E, *et al.* Control parameters for the tunable refractive index of magnetic fluid films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(6): 3849-3852.
- [17] LIU T, CHEN X, DI Z, *et al.* Measurement of the magnetic field-dependent refractive index of magnetic fluids in bulk[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(3): 195-197.
- [18] CHEN Y F, YANG S Y, TSE W S, *et al.* Thermal effect on the field-dependent refractive index of the magnetic fluid film[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(20): 3481-3483.
- [19] WU D, ZHAO Y, LÜ R Q, *et al.* Analysis of tunable refractive index characteristics of the magnetic fluid[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science Edition)*, 2014, 35(7): 931-934(in Chinese).  
吴迪, 赵勇, 吕日清, 等. 磁流体的折射率可调谐特性分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(7): 931-934.
- [20] LI Ch, NING T, WEN X, *et al.* Magnetic field and temperature sensor based on a no-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 72: 104-107.
- [21] WANG Y, TONG Z R, ZHANG W H, *et al.* Research on optical fiber magnetic field sensors based on multi-mode fiber and spherical structure[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(1): 16-20.