

激光与光电子学进展

基于磁流体的温度磁场测量技术研究进展

李永倩^{1,2,3}, 温芳芳^{1,2,3*}, 王劭龙¹

¹华北电力大学电子与通信工程系, 河北 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, 河北 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, 河北 保定 071003

摘要 磁流体的固体磁性和液体流动性在温度与磁场传感领域有很大的应用潜力。将磁流体和光纤传感结构结合, 将外界温度与磁场的信息调制于传输光波上, 通过解调特征光谱的参量, 实现温度与磁场的传感。综述了基于磁流体的温度与磁场传感器的研究进展, 从磁流体与传感结构不同结合方式的角度, 介绍了基于模式干涉、倏逝波、光纤光栅、光纤环镜、光子晶体光纤、表面等离子体、法布里-珀罗(FP)干涉的温度与磁场传感器。分析比较各传感结构的传感原理、灵敏度, 展望未来的发展趋势。其中, 磁流体填充特种光纤的温度与磁场传感器具有较高的灵敏度, 结构稳固, 抗干扰性强。

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: 10.3788/LOP202259.0500003

Research Progress of Temperature and Magnetic Field Dual-Parameter Measurement Technology Based on Magnetic Fluids

Li Yongqian^{1,2,3}, Wen Fangfang^{1,2,3*}, Wang Shaolong¹

¹Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China;

²Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China;

³Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China

Abstract The magnetic properties and fluidity of a magnetic fluid have great potential applications in the field of temperature and magnetic field sensing. The combination of a magnetic fluid and an optical fiber sensing structure can modulate the light wave according to the changes in external temperature and magnetic field and obtain the sensing variation of temperature and magnetic field by demodulating the parameters of the characteristic spectra. This review summarizes the research progress of temperature and magnetic field sensors based on magnetic fluids according to different combinations of magnetic fluids and sensing structures. Furthermore, it introduces the temperature and magnetic field sensors based on mode interference, evanescent wave, fiber grating, fiber ring mirror, photonic crystal fiber, surface plasma, and Fabry-Perot interference. This review analyzes the sensing principle and sensitivity of each sensing structure and presents the future development trend. The temperature and magnetic field sensor with special fiber filled by magnetic fluid is shown to have a high sensitivity, a stable structure, and a strong anti-interference ability.

Key words fiber optics; fiber optic sensing; magnetic fluid; dual-parameter measurement

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-05; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61775057, 61377088)

通信作者: *qingchongffw@126.com

1 引 言

在电力系统、海洋环境勘测、工业生产等领域,磁场与温度的测量显得尤为重要。相比于传统的电磁传感设备,光纤磁场传感器因具有低功耗、耐腐蚀、高灵敏度、可远程检测等优点而广受专家学者的关注。光纤材料与磁敏材料结合,可将外界环境的磁场变化转换为光纤中光的相位、幅度等可监测的参量变化,实现对磁场的测量。

磁流体(MF)是一种具有液体流动性和固体磁性的黑棕色胶体溶液,这种功能性材料表现出多功能的磁光性质,如可调谐折射率^[1]、法拉第效应^[2]、双折射效应^[3]及热透镜效应^[4],其中,由于磁流体的折射率可调特性,它被作为磁敏材料广泛地应用于光纤磁场传感领域^[5-6]。近年来,基于磁流体的光纤磁场传感器成果丰硕,文献[7]从不同的传感机理

角度综述了磁场传感器的研究进展。但由于磁流体也受外界温度的影响,其热光系数小于 $-10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[8],磁性颗粒会因温度改变而发生重排和再分布,导致磁流体的光学特性发生变化,因此基于磁流体的光纤传感器易受外界温度的干扰。为解决温度与磁场的交叉敏感问题并实现温度与磁场的同时测量,将磁流体与光纤结合制成的高灵敏度的温度与磁场传感器逐渐成为近年来的研究热点。其中,磁流体和光纤结合方式各有不同,本文从磁流体与光纤传感结构结合的角度,将基于磁流体的温度与磁场传感器总结为磁流体包覆光纤传感结构、磁流体作为敏感材料填充传感结构两大类,如表1所示。综述近年来温度与磁场双参量测量技术的研究进展,从传感器的传感机理、传感结构以及传感性能等方面简要总结分析基于磁流体的温度与磁场传感器的优缺点和发展趋势。

表1 基于磁流体的温度与磁场传感器分类

Table 1 Classification of temperature and magnetic field sensors based on magnetic fluid

Magnetic fluid-coated optical fiber sensor	Magnetic fluid-filled sensing structure	
	Intrinsic optical fiber filled with magnetic fluid	Extrinsic optical fiber filled with magnetic fluid
Sensors based on mode interference	Photonic crystal fiber sensor	Fabry-Perot interferometer
Sensors based on evanescent wave	Surface plasmon resonance	
Grating-based sensors		
Fiber loop mirror-based sensors		

2 基本原理

磁流体是一种由纳米磁性粒子、基液和表面活性剂组成的黑褐色胶体溶液。磁流体具有许多独特的磁光特性,其中磁流体的折射率可调特性应用广泛。在外界磁场的影响下,磁流体内部的纳米磁性粒子由无规则运动状态转而向磁场方向聚集,逐渐形成磁链,导致磁流体的折射率发生变化^[9]。磁流体的折射率 n_{MF} 可由 Langevin 函数表示:

$$n_{\text{MF}} = (n_s - n_0) \left[\coth \left(\alpha - \frac{H - H_{c,n}}{T} \right) - \frac{T}{\alpha(H - H_{c,n})} \right] + n_0, H > H_{c,n}, \quad (1)$$

式中: H 、 T 分别为外界环境的磁场强度和温度; $H_{c,n}$ 为磁流体折射率开始变化的临界值; n_0 、 n_s 分别为磁流体在磁场环境下的初始折射率和饱和折射率; α 为调节系数。由(1)式可知,环境温度和磁场是影响磁流体折射率的主要因素。在实际应用中,可利

用磁流体折射率受温度和磁场调谐的特性,实现环境温度和磁场的测量。

基于磁流体的光纤温度与磁场传感器正是利用了磁流体的折射率可调特性,将磁流体与光纤传感结构紧密结合,当环境温度或磁场变化时,磁流体的折射率发生变化,进而影响传感光纤的相关参数,使光波生成携带外界信息的光谱。研究人员利用光谱的特征波长、幅度、自由光谱范围、消光比及反射波长等参量来解调外部参数。例如,近年来,提取透射光谱的特征波长偏移量是较为热门的解调方法。选取透射光谱中两个不同衰减峰的波长作为特征波长,当外界温度与磁场的变化量为 ΔT 和 ΔH 时,特征波长的偏移量分别为 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$,可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\lambda_1,T} & K_{\lambda_1,H} \\ K_{\lambda_2,T} & K_{\lambda_2,H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $K_{\lambda_1,T}$ 、 $K_{\lambda_2,T}$ 、 $K_{\lambda_1,H}$ 、 $K_{\lambda_2,H}$ 分别为两个衰减峰特征波长的温度、磁场灵敏度。在实际应用中,得知两

种衰减峰特征波长的波长偏移量,就可同时测量出外界温度与磁场:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{\lambda_1, T} K_{\lambda_2, H} - K_{\lambda_1, H} K_{\lambda_2, T}} \times \begin{bmatrix} K_{\lambda_2, H} & -K_{\lambda_1, H} \\ -K_{\lambda_2, T} & K_{\lambda_1, T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

同样,利用光谱的幅值、消光比和自由光谱范围等参数的灵敏度建立敏感矩阵,也可实现温度与磁场的测量。

3 基于磁流体包覆的温度与磁场传感器

由于磁流体具有液体的流动性,可利用毛细作用将磁流体和传感结构封装于毛细管中,磁流体可作为传感光纤直接接触外部环境,两端用紫外胶固定防止磁流体挥发。对于宏弯或回音壁传感结构等,文献[10]在聚丙烯板中刻U型槽用于固定传感光纤,将传感光纤套入铁氟龙管后,放在U型槽内,用注射器从铁氟龙管的一端注入磁流体,保证磁流体的注入过程没有气泡产生。因磁流体包覆传感结构具有成本低、结构紧凑、制作简单的优点,在温度与磁场传感器设计中应用广泛。

3.1 基于模式干涉的温度与磁场传感器

光纤的不同模式传播速度不同,基于模式干涉的光纤传感器利用这一原理,通过错位^[11]、偏芯^[12]、芯径不匹配^[13]的光纤熔接等方式激发光纤包层中的高阶模,芯模与高阶模的传播常数不同,且包层折射率易受外界折射率的影响。磁流体直接包覆于光纤外部,在包层中传输的光波易受外界环境调制。当温度或磁场发生改变时,磁流体的折射率变化导致包层折射率变化,而纤芯折射率不变,从而引起纤芯和包层中传播的光波的相位差改变,最终实现了外界参量对光波的调制。

2014年, Tang等^[14]利用多模光纤(MMF)和单模光纤(SMF)的芯径不匹配,设计熔接多模-单模-多模(MSM)结构,并封装于装满磁流体的毛细管中。光束通过输入光纤进入多模光纤,激发光纤中的高阶模,高阶模在纤芯与包层中同时传输,最后于输出多模光纤处耦合形成干涉。多模光纤激发出的不同阶次的高阶模与低阶模相互发生干涉,在透射谱中出现多个干涉谷,分析其中两个衰减峰的特征波长在温度和磁场环境下的偏移量,则可知该传感器对外界温度和磁场的灵敏度,建立敏感矩

阵,实现温度与磁场的同时测量。

2017年,赵勇等^[15]将空芯光纤(HCF)和普通单模光纤错位熔接,如图1所示。不同的是,无水乙醇作为温度增敏介质填充于空芯光纤内部,磁流体则作为包覆空芯光纤的外部环境,实验获得的温度与磁场灵敏度分别为 $-468 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $82 \text{ pm}/\text{Oe}$ ($1 \text{ Oe}=0.1 \text{ mT}$)。该传感器利用错位熔接方式和引入空芯光纤与单模光纤芯径不匹配的特点增强了磁场灵敏度,空芯光纤填充无水乙醇的处理增强了温度灵敏度,但由于无水乙醇沸点低,该传感器的温度测量范围具有局限性。

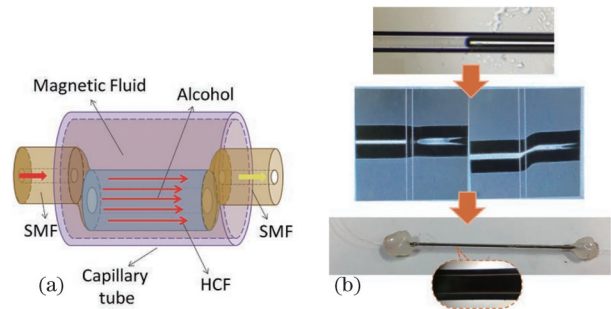


图1 单模-空芯-单模光纤^[15]。(a)单模-空芯-单模光纤错位熔接结构;(b)传感结构实物

Fig. 1 Single mode-hollow-single mode fiber misalignment fusion structure; (b) physical production of sensing structure

2018年, Dong等^[16]提出无芯-D型-无芯光纤传感结构,如图2所示。D型光纤(DSF)由气相沉积法制得,其中一侧被研磨抛光,D型侧的包层厚度减小至 $42.5 \mu\text{m}$,长度为 42 mm 。光束通过无芯光纤(CF)分别进入磁流体、D型光纤纤芯、包层中传输,在输出无芯光纤中形成干涉。由于D型光纤纤芯与外界环境的距离减小,增强了与外界环境的相互

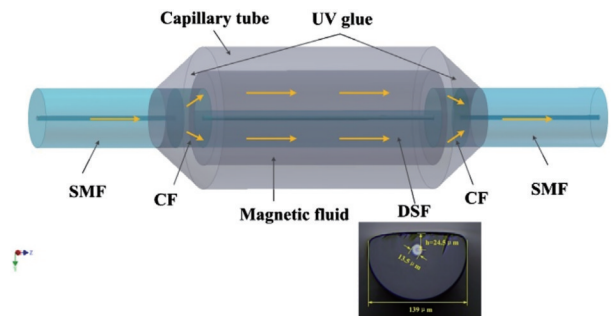


图2 无芯-D型-无芯光纤传感结构,插图为D型光纤横截面^[16]

Fig. 2 Coreless-D type-coreless optical fiber sensing structure, inset is cross section image of the DSF^[16]

作用,获得了一77.49 pm/°C与99.68 pm/Oe的温度与磁场灵敏度。

温度与磁场双参量同时测量的基本机理主要依靠两个不同衰减峰的波长或幅度参数变化,因此传感器能产生两个及以上不同衰减峰是设计温度与磁场传感器的关键。

3.2 基于倏逝波的温度与磁场传感器

为提高温度和磁场传感器的灵敏度,减小光纤的直径、增强倏逝波不失为一个好方法^[17]。通过熔融、电弧拉锥或者化学腐蚀等方法改变光纤的直径,破坏光纤传输光波的全反射条件,改变内部光场分布。随着锥区光纤包层与纤芯直径减小,纤芯中传输的光波耦合进入包层或辐射出包层传输,倏逝场增大,光波与外界环境有更加充分的相互作用,获取更高灵敏度的传感信号。

2015年,Liu等^[18]通过电弧拉锥制得长为450 μm、腰区直径为7.8 μm的超细光纤锥,由于腰

区直径变小,泄漏至磁流体中的能量增多,光波与外界环境充分接触,实验制得一0.587 nm/°C,0.171 nm/Oe的温度与磁场传感器。但由于超细光纤锥的腰区直径太小,使用浓度较大的磁流体时在高磁场区域存在“切断”现象,因此该传感器适用低浓度的磁流体包覆,磁流体更容易在弱磁场饱和,磁场检测范围较小,该传感器在实现高灵敏度测量的同时牺牲了检测范围。2016年,Yan等^[19]采用广角波束传播法进行了数值仿真。如图3所示,随着细芯光纤直径的减小,倏逝场的能量变大,灵敏度显著提高。利用体积分数为40%的氟化氢溶液(HF)腐蚀细芯光纤(TCF)的包层,分别制成腰区直径为65 μm和25 μm的细芯光纤锥传感器。其中,65 μm直径的光纤锥获得一65 pm/°C,一21 pm/Oe的温度与磁场灵敏度,25 μm直径的光纤锥获得一497 pm/°C,一128 pm/Oe的温度与磁场灵敏度。实验证明光纤的腰区直径越小,温度磁场传感器的灵敏度越高。

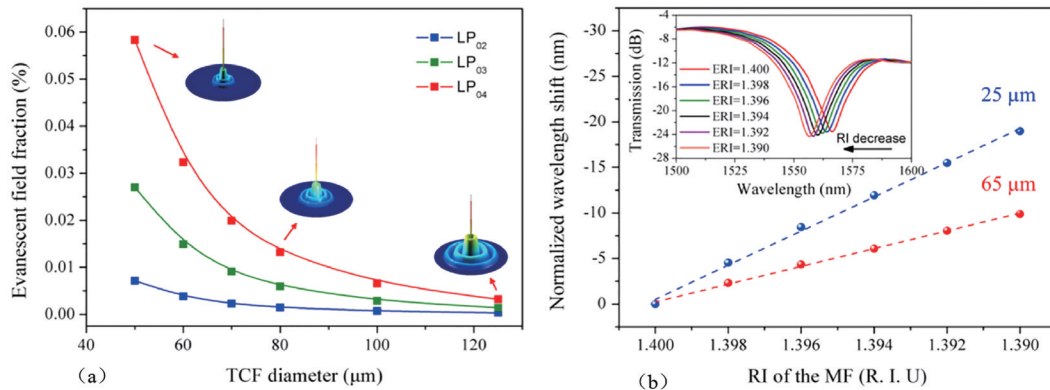


图3 广角波束传播法仿真结果^[19]。(a)倏逝波能量与细芯直径的关系;(b)锥区直径为25 μm和65 μm的光谱波长与折射率的关系,插图为透射光谱随折射率的响应情况

Fig. 3 Simulated results of wide-angle beam propagation method^[19]. (a) Relationship between the energy of the evanescent wave and the diameter of the thin core; (b) relationship between the spectral wavelength and the refractive index of the cone diameter of 25 μm and 65 μm, the inset shows the response of the transmission spectra with the refractive index

2017年,Bhardwaj等^[20]利用HF腐蚀制成腰锥直径为80 μm的多模光纤锥,两端熔接在单模光纤之间,作为传感区。实验获得灵敏度为0.0502 dB/°C,0.993 dB/mT的温度与磁场传感器,且由实验可知该传感器的时间响应为25 s。2016年,Li等^[21]熔融加热双包层单模光纤,制成长为20 mm、直径为10 μm的微纳光纤。该传感器利用透射光谱的消光比和波长的响应情况来解调温度与磁场。如图4所示,消光比随磁场的增加而减小,但与温度变化的线性度较小。该解调方法虽不需要两个特征波长,但光谱的消光比受光源功率波动和光谱仪等器件

信噪比影响。

3.3 基于光纤光栅的温度与磁场传感器

基于模式干涉的温度与磁场双参量测量往往需要两个及以上不同灵敏度的衰减峰来实现。基于模式干涉的传感器激发的高阶模众多,多模式之间相互影响,存在衰减峰的灵敏度一致、敏感矩阵不可逆的问题,由此引入光纤光栅与模式干涉仪结合。光纤光栅具有体积小、可刻蚀或可级联在其他光纤上的优点。由文献^[22]可知,光栅对磁场响应的原理在于光栅的磁致旋光效应,经研究表明在磁场环境下,偏振光通过光纤光栅后的

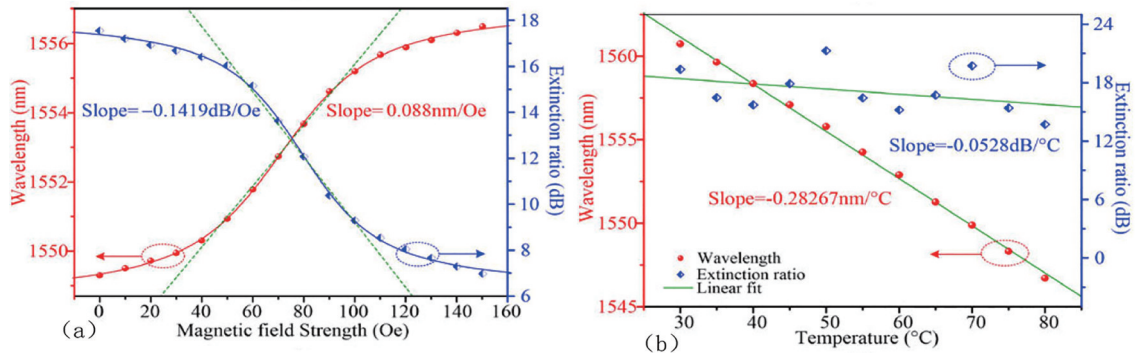


图 4 透射谱参量与相关参数的关系^[21]。(a)透射谱参量与磁场强度的关系;(b)透射谱参量与温度的关系
Fig. 4 Relationship between transmission spectrum parameters and related parameters^[21]. (a) Relationship between transmission spectrum parameters and magnetic field strength; (b) relationship between transmission spectrum parameters and temperature

透射谱会发生微弱变化且灵敏度极低。因此,利用光纤布拉格光栅(FBG)对温度敏感和对磁场敏感度极低的特性,可解决敏感矩阵不可逆的问题。模式干涉仪和光纤光栅结合后均可保持各自的光谱特性,为温度与磁场双参量测量技术提供一种有效的方法。

2013年,Zheng等^[23]利用2°的倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)来测量温度与磁场。TFBG是一种具

有新结构和新特点的多功能光纤光栅,光栅的轴向和光纤的轴向存在一定的角度,可将光纤基模耦合进入包层模,因此倾斜光栅的谐振波长与包层的有效折射率有关。用磁流体包覆倾斜光栅,外界磁场通过磁流体调制传输光波的波长与幅度,如图5所示。通过监测 TFBG 包层模谐振峰的消光比和光谱波长的变化,实现了0~196 Gs(1 Gs=0.1 mT)的磁场测量,温度的灵敏度为8.4 pm/°C。

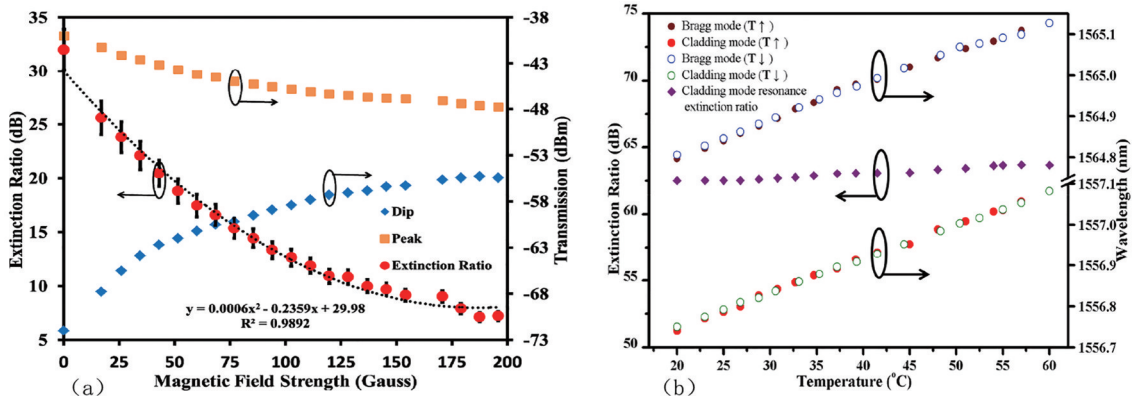


图 5 透射谱参量与相关参数的关系^[23]。(a)透射谱参量与磁场强度的关系;(b)透射谱参量与温度的关系
Fig. 5 Relationship between transmission spectrum parameters and related parameters^[23]. (a) Relationship between transmission spectrum parameters and magnetic field strength; (b) relationship between transmission spectrum parameters and temperature

2015年,Li等^[24]将无芯光纤和FBG级联,由于输入光纤与无芯光纤的芯径不匹配,激发高阶模式,制成模式干涉仪,级联FBG实现温度补偿,其中温度与磁场的灵敏度分别为-88.71 pm/°C、77.4 pm/mT,FBG的温度灵敏度为11.93 pm/°C。相比于FBG,长周期光纤光栅(LPFG)的温度灵敏度更高^[25],且LPFG耦合模式是纤芯基模和同向传输的各阶包层模之间发生的耦合模式,LPFG对环境折射率的灵敏度较高。2015年,Miao等^[26]采用LPFG和腐蚀后的多模光纤级联,制成温度与磁场

传感器,温度与磁场的灵敏度为-0.04048 nm/°C、0.02878 nm/Oe,LPFG的温度与磁场灵敏度分别为0.03929 nm/°C、0.0024 nm/Oe,其中LPFG的温度灵敏度高于FBG。

2016年,Chen等^[10]将单模光纤大幅度弯曲,曲率直径D=4 mm,在右侧弯曲臂上级联FBG,封装于装满磁流体的铁氟龙管里,如图6所示,实验获得8.1 pm/°C、0.1426 nm/Oe的温度与磁场灵敏度。同年,赵月等^[27]熔接制作细锥和花生型粗锥组合成的马赫-曾德尔干涉仪,如图7所示。细锥和花生型

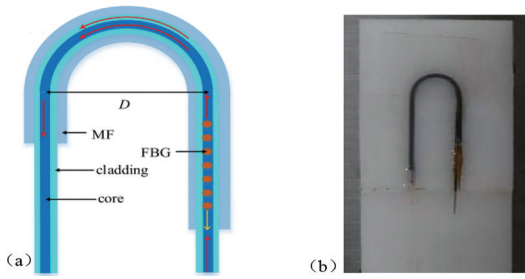


图 6 FBG 级联宏弯光纤^[10]。(a) FBG 级联宏弯光纤结构；(b) FBG 级联宏弯光纤结构实物图

Fig. 6 FBG cascaded macro-bend fiber. (a) FBG cascaded macro-bend fiber structure; (b) photo of FBG cascaded macro-bend fiber structure

粗锥分别起到激发高阶模和耦合多种模式形成干涉的作用。在该马赫-曾德尔干涉仪的输出端级联 FBG, 实现温度与磁场的双参量测量。

3.4 基于光纤环境的温度与磁场传感器

光纤环境的原理是 Sagnac 效应。基于光纤环境的温度与磁场传感器解调原理与光纤光栅式类

似, 不同的是, Sagnac 效应中顺时针和逆时针同时传输的光束形成的光谱代替 FBG 透射谱, 与模式干涉谱构成两种不同传感机理的衰减峰。

2019 年, Sun 等^[28]在椭圆芯旋转光纤环镜 (E-FLM) 中引入无芯光纤组成 Sagnac 环, 如图 8 所示。椭圆芯旋转光纤 (ECSF) 具有高双折射性, 与无芯光纤级联组成单模-无芯-椭圆芯旋转光纤-单模的传感结构 (SNES), 包覆于磁流体中, 利用单模光纤与无芯光纤模场的不匹配激发高阶模, 经过椭圆芯旋转光纤后产生模式干涉。另一种衰减峰则是光束在 Sagnac 环中因顺时针和逆时针传输产生相位差, 在耦合器 4 端口发生干涉产生的。温度影响椭圆芯旋转光纤的双折射特性, 因此该 Sagnac 机理形成的光谱的自由光谱范围将随外界温度变化而发生变化, 对磁场的灵敏度为 0 pm/mT 。磁场仅影响磁流体的折射率, 对无芯光纤与椭圆芯旋转光纤形成的模式干涉谱进行调制, 实验获得的温度与磁场灵敏度分别为 $-34.8 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ 、 712.07 pm/mT 。

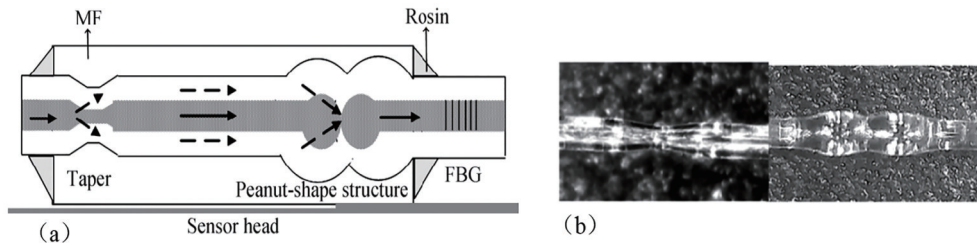


图 7 细锥和花生型粗锥级联 FBG^[27]。(a) 细锥和花生型粗锥级联 FBG 结构; (b) 电子显微镜下传感结构图

Fig. 7 Thin cone and peanut-shaped thick cone cascade FBG^[27]. (a) Thin cone and peanut-shaped thick cone cascade FBG

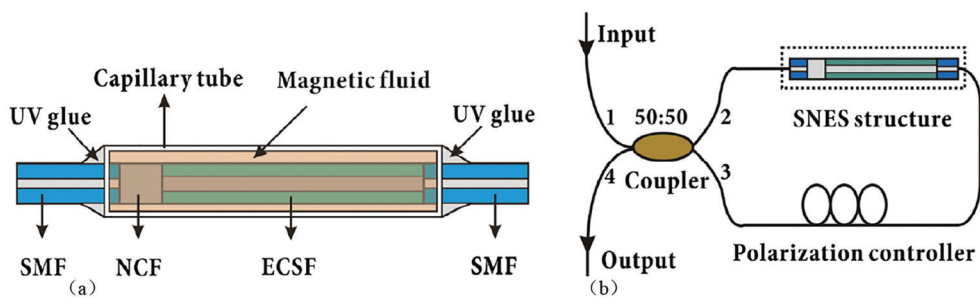


图 8 椭圆芯旋转光纤环镜的传感结构与系统^[28]。(a) NCF 与 ECSF 组合的模式干涉结构; (b) 椭圆芯旋转光纤环镜

Fig. 8 Sensing structure and system of E-FLM^[28]. (a) Mode interference structure with NCF and ECSF; (b) E-FLM

4 基于磁流体填充结构的温度与磁场传感器

磁流体的流动特性使得磁流体的应用多种多样。近年来, 磁流体与传感结构的结合方式除了采用磁流体包覆传感结构外, 利用毛细作用将磁流体

填充至传感结构内部的方式也备受关注。

4.1 磁流体填充传感光纤内部的温度与磁场传感器

随着传感技术的发展, 光子晶体光纤因独特的结构、优异的光学特性, 在光纤传感领域应用广泛。光子晶体光纤包层内部有各式各样的空气孔结构, 由于空气孔降低了光子晶体光纤包层的折射率, 光

被很好地约束在纤芯中传输。将气体或液体填充这些气孔,光子晶体光纤的模场直径、双折射特性等将发生相应的改变^[29]。由于磁流体对外界温度和磁场敏感,将磁流体填充光子晶体光纤内部或选择性填充光子晶体光纤的空气孔,改变光子晶体光纤的光学性质,获取高灵敏度的温度与磁场传感特性,这是近年来的研究热点。

4.1.1 基于光子晶体的温度与磁场传感器

2015年,Zhao等^[30]在光子晶体波导的空气孔中填充两种不同类型的磁流体。如图9(a)所示,在光子晶体槽内有两个半径为 r_1 、 r_2 的级联光子晶体腔,

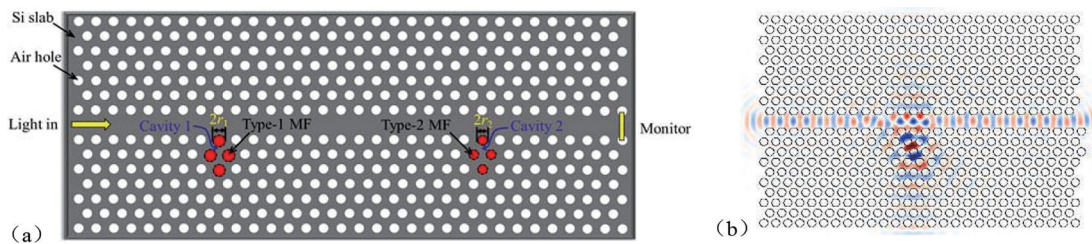


图9 MF填充PCF的传感结构与数值仿真^[30]。(a)基于MF填充PCF的温度与磁场传感结构;(b)光频率与谐振频率相匹配时,微腔的电场分布

Fig. 9 Sensing structure and numerical simulation of MF filled PCF^[30]. (a) Temperature and magnetic field sensing structure based on MF penetrating PCF; (b) when the optical frequency matches the resonance frequency, the electric field distribution of the microcavity

2017年,高源等^[31]在两种光子晶体光纤的纤芯区域刻蚀光纤光栅,制成光子晶体光纤光栅(PCFBG),将填充磁流体的光子晶体光纤光栅与普通光子晶体光纤光栅级联,通过分析热光效应、磁光效应以及弹光效应对不同光波模式的影响,探究谐振波峰反射谱响应特性,实现温度、磁场与应变的三参量测量。

相比于选择性填充光子晶体光纤,全填充光子晶体光纤操作简单、成本低,同样可实现高灵敏度。2018年,Li等^[32]将磁流体填充光子晶体光纤全部气孔,再将光子晶体光纤两端与单模光纤熔接,构成马赫-曾德尔干涉仪。对透射谱进行傅里叶变换后,选取 0.03 nm^{-1} 、 0.07 nm^{-1} 处的特征谱测量温度与磁场,实验获得磁场灵敏度和温度灵敏度分别为 0.072 nm/Gs 、 $-0.08 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。

4.1.2 基于表面等离子体共振的温度与磁场传感器

表面等离子体共振(SPR)一般指的是TM偏振光与金属的表面等离子体波(SPW)之间相互耦合产生的共振,一般发生在金属与介质界面处,这种共振会导致界面上反射光的强度急剧降低,从而形成共振波谷。

大部分光纤SPR传感器都需要去除光纤包层,

将两种不同类型的磁流体分别填充到光子晶体槽的四个空气孔,形成谐振腔。通过有限差分时域方法对光子晶体波导的性质进行数值研究,如图9(b)所示,当光频率与谐振频率相匹配时,谐振腔内的光能有显著的放大作用,其中,谐振腔的最内层孔具有较强的光场。光波能与磁流体充分作用,这导致谐振腔对折射率变化非常敏感,可实现高灵敏度的温度与磁场测量。级联的两个光子晶体腔的谐振波长相互独立且对外部磁场和温度敏感度不同。通过测量两个谐振波长对外部环境的响应灵敏度建立敏感矩阵。

使倏逝波能够与镀在裸纤芯外层的金属膜的表面等离子体波发生共振。然而,去除普通光纤的石英包层需要复杂的操作,例如腐蚀、拉锥、抛磨。2019年,李佳欢等^[33]将光子晶体光纤空气孔可自由填充设计的优势与表面等离子体共振效应结合。如图10(a)所示,在光子晶体光纤包层的第二层大孔径空气孔壁涂覆金薄膜, Δ 表示包层空气孔的孔间距, d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 分别表示中心空气孔、包层空气孔、通道1空气孔、通道2空气孔的直径, t_{Au1} 、 t_{Au2} 分别为通道1与通道2中空气孔壁涂覆金薄膜的厚度。通道1与通道2分别填充磁流体和聚二甲基硅氧烷(PDMS),其中PDMS用作温度增敏,对磁场不敏感。为了减小两个通道间的交叉干扰,采用较高介电常数的 Ta_2O_5 涂覆于通道2的金薄膜外部, Ta_2O_5 的厚度为 t_{ao} 。通道2的衰减峰波长向长波长方向移动,而磁流体填充形成的衰减峰不受影响,从而增大两衰减峰的距离,便于外界参量的测量。该传感器获得较高的灵敏度,且尺寸小,可很好地应用于光器件集成和双参量测量领域。

2020年,Liu等^[34]将双芯光子晶体光纤的中心孔镀上银膜和石墨烯,再将磁流体填充该孔中,并利

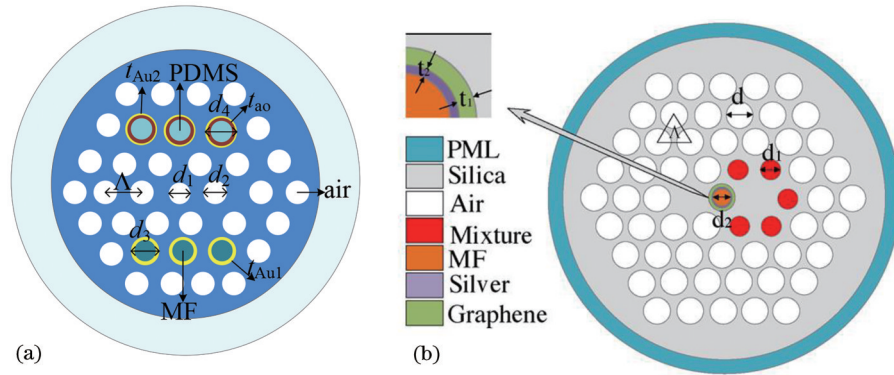


图 10 不同文献中的 PCF 横截面。(a) PCF 的横截面^[33]; (b) PCF 的横截面^[34]

Fig. 10 PCF cross-sections in different literatures. (a) Schematic of the cross-section of the PCF^[33]; (b) schematic of the cross-section of the PCF^[34]

用具有完美匹配层(PML)边界条件的有限元法进行了数值分析,选择最优的结构参数。如图 10(b)所示, d 为包层空气孔的直径, d_1 为右芯相邻孔的直径, d_2 为中心孔的直径, t_1 、 t_2 分别为银膜和石墨烯层的厚度。在右芯相邻空气孔中填充氯仿和甲苯混合物,不仅可以提高温度灵敏度,也增加了右芯相邻空气孔的折射率,使其产生光子带隙效应。左芯相邻空气孔的折射率较小,光波在左芯中全反射传播,从而左右双芯分别与金属的表面等离子波作用形成不同的传感机制。当满足共振条件,可形成衰减峰。该传感结构引入了两种传感机制,在特定的波长范围内,左右芯之间不存在能量交换。因此,该结构也适用于遥感和安全监控领域,稳定性良好。

4.2 磁流体填充非本征传感腔的温度与磁场传感器

基于磁流体填充非本征传感腔的温度与磁场传感器大部分是将磁流体填充到 FP 腔内的,再级联光纤光栅实现温度补偿。光纤 FP 干涉机理是光束在两个光纤端面反射后耦合进入纤芯,从而产生干涉。光纤 FP 干涉仪对外界磁场等因素不敏感,则需要将敏感材料填充 FP 腔制成对某一参数敏感的传感器。由于磁流体具有流动性,且磁流体的折射率随外界温度和磁场变化而变化,将磁流体填充 FP 腔制成温度与磁场传感器的方法备受关注。

2014 年, Zhao 等^[35]利用六维调节架制作一个腔长为 $36 \mu\text{m}$ 、磁流体填充的 FP 传感器,用环氧胶密封于玻璃毛细管。利用磁流体和 FBG 对外界环境的响应情况来调制 FP 传感器的反射谱,实验测得最大磁场强度高达 600 Gs,灵敏度为 0.04 nm/Gs ,测量分辨率为 0.5 Gs ,温度灵敏度为 $0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

2017 年, Li 等^[36]提出一种基于复合干涉结构的高灵敏度双参数传感器,其系统图如图 11 所示,将

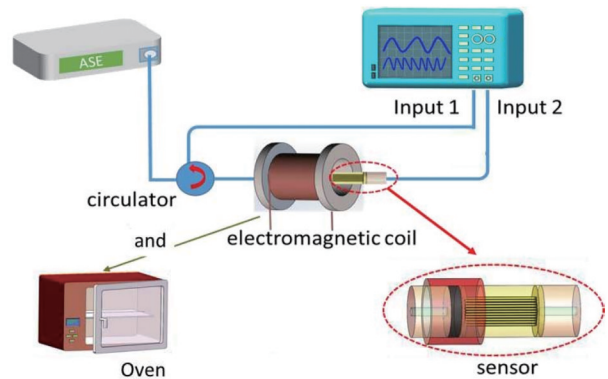


图 11 复合干涉结构系统框图^[36]

Fig. 11 System block diagram of composite interference structure^[36]

填充磁流体的 FP 干涉仪和光子晶体光纤级联,用酒精填充光子晶体光纤,当外界温度变化时,酒精的折射率发生变化,从而影响包层的有效折射率,使传感器的透射光谱发生改变。因此,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,并且互不干扰。

5 总结与讨论

从磁流体与传感结构的组合形式角度,介绍了基于模式干涉、倏逝波、光纤光栅、光纤环镜、光子晶体光纤、表面等离子体、FP 干涉的温度与磁场传感器并分析其传感原理。如表 2 所示,通过比较它们磁场与温度的灵敏度,可知磁流体填充光子晶体光纤气孔和利用倏逝波原理的传感器具有较高的灵敏度,其中利用不同类型的磁流体分别选择性填充 PCF 空气孔的传感器的磁场灵敏度高达 89 nm/mT ,磁场测量范围达到 0.06 T ^[30],该检测范围是磁流体填充全光子晶体光纤气孔^[32]的 10 倍。

基于倏逝波原理的超细光纤锥的磁场灵敏度达到 $0.171 \text{ nm/Oe}^{[18]}$,但其磁场检测范围小,移动困难。磁流体选择性填充光子晶体光纤气孔传感器的灵敏度最高,磁场测量范围广,但是操作复杂、实现困难。利用倏逝波原理的光纤传感结构的制作涉及熔融拉锥、化学腐蚀、飞秒微加工等方法,危险系数较高,且传感结构通常不易移动、保存困难,实用性存在一定的问题。

从表 2 可知,通常在传感结构中填充增敏材料

的传感结构灵敏度较高,如磁流体、酒精、二甲基硅氧烷等填充光子晶体光纤、空芯光纤等。特种光纤的传感结构的灵敏度高于一般光纤制成的传感器。因此,从提高传感器灵敏度的角度,可用磁流体选择性填充光子晶体光纤气孔、减小光纤直径增大倏逝场、增敏材料填充特种光纤等方法。从制作简单、结构稳固的角度,采用特种光纤、宏弯结构、磁流体填充全光子晶体光纤气孔等方法不错的选择。从温度与磁场传感机理的角度,近年来的研究

表 2 基于磁流体的温度与磁场传感器的研究进展

Table 2 Research progresses of temperature and magnetic field sensors based on magnetic fluid

Existence of magnetic fluid in sensors	Sensing mechanism	Fiber configuration	Detecting range	Sensitivity	Reference	
MF coated sensing sensor	Mode interference	NCF	20-140 Oe, 20-70 °C	7.433 pm/Oe, -0.246 pm/°C	[37]	
		HCF filled with alcohol	0-169 Oe, 26-56 °C	82 pm/Oe, -468 pm/°C	[15]	
		NCF+D type fiber+NCF	0-21 Oe, 30-55 °C	99.68 pm/Oe, -77.49 pm/°C	[16]	
	Evanescent wave	Optical microfiber taper	20-70 Oe, 30-80 °C	0.171 nm/Oe, -0.587 nm/°C	[18]	
		Etched thin core fiber	0-299.6 Oe, 19-38.5 °C	-128 pm/Oe, -497 pm/°C	[19]	
	Fiber grating	Double cladded single-mode fiber taper	0-150 Oe, 30-80 °C	88 pm/Oe, -282.67 pm/°C	[21]	
		Dual S-bend+thin fiber+FBG	0-230 Oe, 20-60 °C	-0.0678 dB/Oe, -0.04 dB/°C	[38]	
		Macro-Bending Fiber+FBG	0-150 Oe, 28.6-57.2 °C	0.1426 nm/Oe, 8.1 pm/°C	[10]	
	Fiber loop mirror	NCF+ECSF	0-9 mT, 10-45 °C	713.07 pm/mT, -34.8 pm/°C	[28]	
	MF filled sensing structure	PCF	Different types of MF filled PCF	0-0.06 T, 250-345 K	89 nm/mT, -0.0393 nm/K	[30]
MF filled the two vertical air holes of PCF			0-60 mT, 0-70 °C	-1.927 nm/mT, 0.512 pm/°C	[40]	
MF filled PCF			0-66.6 Gs, 20-60 °C	0.072 nm/Gs, -0.08 nm/°C	[32]	
SPR		PDMS and MF filled PCF	20-300 Oe, 20-50 °C	82.69 pm/Oe, -317.1 pm/°C	[33]	
		MF filled dual-core PCF	0-50 mT, 20-50 °C	0.44 nm/mT, -0.37 pm/°C	[34]	
Extrinsic optical fiber filled with magnetic fluid		FP	FBG+FP	20-60 mT, 20-95 °C	0.23 nm/mT, -0.092 nm/°C	[41]
			FP+PCF_Alcohol	0-166.7 Gs, 28-53 °C	0.033 nm/Gs, -0.236 nm/°C	[36]

大多采用不同传感机理的特征谱波长解调,且这种波长解调的方法受光源噪声的影响较低,比幅值解调或消光比解调更可取。

磁流体和光纤传感器的结合在磁场传感领域具有灵敏度高、抗电磁干扰、功耗低等优点,但在实用化过程中仍面临一些挑战。

1) 传感器的封装。基于磁流体的温度磁场传感器常常将磁流体和传感结构封装于毛细管或铁氟龙管中,在封装过程中需保证磁流体均匀地包覆于传感结构表面或填充于传感结构中。为防止泄漏和挥发,选择硅胶、紫外(UV)胶或环氧树脂胶等封装胶水封装。但是封装胶水存在热膨胀效应,如UV胶的热膨胀系数为 $47 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [42],对实验产生一定的干扰。因此需牺牲传感器的结构尺寸小的优势,使封装胶水远离传感区域,减小对实验的干扰。传感器的封装不仅影响传感器灵敏度,还决定了该传感结构的可重复性。

2) 制作复杂、保存困难。对于磁流体填充传感结构内部的温度磁场传感器,灵敏度高,但是实现较为困难,如目前选择性填充光子晶体光纤气孔的方法有熔接机电弧放电空气孔塌陷法、紫外线可擦除聚合物手动粘合法、飞秒激光微加工法、氢氟酸的侧向腐蚀结合石蜡法等,制作成本高。基于倏逝波传感机理的传感器中,光纤直径减小甚至小于 $10 \mu\text{m}$,使用过程中易折断,保存困难。

3) 响应速度慢,测量范围窄。在磁场改变时,磁流体的磁性颗粒打破受力平衡,沿着磁场方向聚集,形成磁链并需要一定的时间稳定。其中,文献[19]通过周期性地给电磁铁电流来实现磁场的开关控制,测得细芯锥的磁场响应时间为 21.5 s ,文献[20]测得的响应时间为 25 s ,因此基于磁流体的温度与磁场传感器不适用于瞬态磁场的测量。且磁流体存在磁饱和现象,当磁场达到磁饱和和强度时,磁流体的折射率不随外界磁场的增加而变化,磁场的测量范围受到限制。

由于磁流体的固体磁性和液体流动性,磁流体与光纤传感器结合制成的磁场传感器具有低成本、高灵敏度、抗电磁干扰的优势,且磁流体的折射率对温度和磁场都有响应,在电磁测量领域、工业生产领域具有很好的应用前景。

6 结束语

磁流体的流动特性和折射率可调特性使其在

磁场传感领域中得到了广泛的应用,在工业生产、海底勘测等领域磁场和温度的检测显得格外重要。综述了磁流体包覆传感结构、磁流体填充温度磁场传感器的研究进展,简要阐述其传感原理,比较传感灵敏度,分析造价成本、实用化情况。在高灵敏度和强稳定性方面,磁流体作为磁敏材料填充传感结构的方案更具优势。在实用化方面,随着制备工艺的发展,磁流体的磁场测量范围以及封装技术有待进一步的提高,基于磁流体的温度与磁场传感器有望实现商业化应用。

参 考 文 献

- [1] 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), 2014, 35(7): 931-934.
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.
- [2] Maiorov M M. Faraday effect in magnetic fluids at a frequency 10 GHz[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 111-113.
- [3] Zubarev A Y. On the theory of birefringence in magnetic fluids[J]. Colloid Journal, 2012, 74(6): 695-702.
- [4] Mahdih M H, Akbari J M. Optical characterization of thermal lens effect in ethanol and the influence of focusing lens and liquid cell size[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 78-82.
- [5] Wang H T, Pu S L, Wang N, et al. Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3765-3768.
- [6] 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.
- [7] Liu Y C, Liu Y M, Xu C. Review of magnetic fluid fiber magnetic field sensing technology[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(11): 1-7.
刘玉婵, 刘月明, 徐程. 磁流体光纤磁场传感技术综述[J]. 光通信技术, 2020, 44(11): 1-7.
- [8] 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.

- [9] Jing Y J, Han X X, Yang H K, et al. Study on the tunable properties of refractive index of magnetic fluid based on Fresnel reflection theory[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2020, 31(7): 669-674.
荆雅洁, 韩笑笑, 杨濠琨, 等. 基于菲涅尔反射的磁流体折射率可调谐特性研究[J]. *光电子·激光*, 2020, 31(7): 669-674.
- [10] 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.
- [11] Luo L F, Pu S L, Dong S H, et al. Fiber-optic magnetic field sensor using magnetic fluid as the cladding[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 236: 67-72.
- [12] Dong S H, Pu S L, Wang H T. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with taper-like and lateral-offset fusion splicing[J]. *Optics Express*, 2014, 22 (16): 19108-19116.
- [13] Pu S L, Tang J L, Liu Z H, et al. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad no-core single-mode no-core fiber structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(12): 1206002.
卜胜利, 汤佳莉, 刘志恒, 等. 磁流体包覆的无芯-单模-无芯光纤结构的磁场传感特性[J]. *光子学报*, 2015, 44(12): 1206002.
- [14] Tang J L, Pu S L, Dong S H, et al. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad multimode-singlemode-multimode fiber structures[J]. *Sensors*, 2014, 14(10): 19086-19094.
- [15] Zhao Y, Cai L, Li X G, et al. A modal interferometer based on single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber structure filled with alcohol and magnetic fluid for simultaneously measuring magnetic field and temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070601.
赵勇, 蔡露, 李雪刚, 等. 基于酒精与磁流体填充的单模-空芯-单模光纤结构温度磁场双参数传感器[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070601.
- [16] 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.
- [17] Zhang J Y, Qiao X G, Yang H Z, et al. All-fiber magnetic field sensor based on tapered thin-core fiber and magnetic fluid[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2): 200-204.
- [18] Liu Z J, Yu Y S, Zhang X Y, et al. An optical microfiber taper magnetic field sensor with temperature compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15 (9): 4853-4856.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Li J, Fan P C, Tian Z, et al. Potential for simultaneous measurement of magnetic field and temperature utilizing fiber taper modal interferometer and magnetic fluid[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 1-9.
- [22] Kersey A D, Marrone M J. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2360: 53-56.
- [23] 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.
- [24] Li C, 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.
- [25] Wang J. The construction of fiber sensing measurement based on long period fiber grating[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019: 2-15.
王进. 基于长周期光纤光栅构建光纤传感测量的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019: 2-15.
- [26] Miao Y P, Zhang H, Lin J C, et al. Simultaneous measurement of temperature and magnetic field based on a long period grating concatenated with multimode fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(13): 132410.
- [27] Zhao Y, Cao Y, Tong Z R, et al. Simultaneous measurement of dual-parameter based on optical fiber magnetic field sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1206004.
赵月, 曹晔, 童峥嵘, 等. 可双参量同时测量的光纤磁场传感器[J]. *光子学报*, 2016, 45(12): 1206004.
- [28] Sun C R, Wang M G, Dong Y, et al. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on NCF cascaded with ECSF in fiber loop mirror[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 45-49.

- [29] Zhao Y, Zhang Y Y, Wang Q, et al. Photonic crystal fibers Bragg grating filled magnetic fluid for magnetic fields sensing[J]. *Sensor Letters*, 2012, 10(1): 465-470.
- [30] Zhao Y, Zhang Y N, Lü 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.
- [31] Gao Y, Dong B C, Tan C, et al. Three-parameter measurement based on cascaded Bragg gratings in magnetic fluid-infiltrated photonic crystal fiber[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2017, 28(12): 1344-1350.
高源, 董碧成, 谭策, 等. 磁流体填充的光子晶体光纤 Bragg 光栅三参量同时传感特性研究[J]. *光电子·激光*, 2017, 28(12): 1344-1350.
- [32] Li X G, Zhou X, Zhao Y, et al. Multi-modes interferometer for magnetic field and temperature measurement using photonic crystal fiber filled with magnetic fluid[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 41: 1-6.
- [33] Li J H, Pei L, Wang J S, et al. Temperature and magnetic field sensor based on photonic crystal fiber and surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0210002.
李佳欢, 裴丽, 王建帅, 等. 基于光子晶体光纤表面等离子体共振的温度和磁场双参量传感器[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 2210002.
- [34] Liu H, Chen C C, Wang H R, et al. Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on surface plasmon resonance in twin-core photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2020, 203: 164007.
- [35] Zhao Y, Lü 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.
- [36] 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.
- [37] Su G H, Shi J, Xu D G, et al. Simultaneous magnetic field and temperature measurement based on no-core fiber coated with magnetic fluid[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(23): 8489-8493.
- [38] Zhao Z Y, Tang M, Gao F, et al. Temperature compensated magnetic field sensing using dual S-bend structured optical fiber modal interferometer cascaded with fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27515-27523.
- [39] Zhang R, Pu S L, Li Y Q, et al. Mach-Zehnder interferometer cascaded with FBG for simultaneous measurement of magnetic field and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(11): 4079-4083.
- [40] Liu H, Tan C, Zhu C H, et al. Simultaneous measurement of temperature and magnetic field based on directional resonance coupling in photonic crystal fibers[J]. *Optics Communications*, 2017, 391: 111-115.
- [41] Xia J, Wang F Y, Luo H, et al. A magnetic field sensor based on a magnetic fluid-filled FP-FBG structure[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 620-630.
- [42] Wang D. Study on a novel optical fiber Fabry-Perot magnetic field sensor based on magnetic fluids[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 17-19.
王丹. 基于磁流体的新型光纤 Fabry-Perot 磁场传感器研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 17-19.