

磁流体光纤磁场传感技术综述

刘玉婵,刘月明,徐程

(中国计量大学 光学与电子科技学院,杭州 310018)

摘要:针对磁流体的光学磁光特性,着重介绍了常见的5种类型的光纤磁场传感器,包括基于干涉机理的光纤磁场传感器、基于光纤光栅结构的光纤磁场传感器、基于倏逝波机理的光纤磁场传感器、基于表面等离子体共振机理的光纤磁场传感器和基于光子带隙效应机理的光纤磁场传感器,分别分析了各种磁流体光纤磁场传感器的技术性能,并指出其技术难点,最后展望了磁流体光纤磁场传感器的研究方向。

关键词:磁流体;光纤传感器;传感机理;磁场测量

中图分类号:TN253;O436.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)11-0001-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review of magnetic fluid fiber magnetic field sensing technology

LIU Yuchan, LIU Yueming, XU Cheng

(College of Optics and Electronic technology, China Jiliang university, HangZhou 310018, China)

Abstract: According to the optical and magneto-optical characteristics of magnetic fluid, five kinds of common fiber magnetic field sensors are introduced, including fiber magnetic field sensor based on interference mechanism, fiber magnetic field sensor based on fiber grating structure, fiber magnetic field sensor based on evanescent wave mechanism, fiber magnetic field sensor based on surface plasmon resonance mechanism field sensor and fiber magnetic field sensor based on photonic band gap effect mechanism, various technical performances of magnetic fluid fiber magnetic field sensor are analyzed, and the technical difficulties are pointed out. Finally, the research direction of magnetic fluid fiber magnetic field sensor is prospected.

Key words: magnetic fluid; optical fiber sensor; sensing mechanism; magnetic field measurement

0 引言

近年来,磁场传感技术得到了迅速发展,在航空航天、医学、海底环境检测、地质勘探和电力系统等领域被广泛应用^[1-3],并发挥着重要的作用。传统的磁传感器通常为霍尔磁传感器、磁阻传感器和磁通门传感器等电信号类型^[4-6],但这类传感器通常存在体积大、无法实现微型化等问题。光纤磁场传感器继承了光纤传感器的优点,具有体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰能力强、便于分布式多点测量和全光传输等突出优点,目前已成为磁场传感技术的主要研究方向之一。光纤磁

场传感器按照传感机理主要有如下原理类型:基于光纤表面进行磁致伸缩材料镀膜,利用镀膜的磁致伸缩敏感特性进行传感^[7-8],但是磁致伸缩镀膜与光纤的结合度不是很高,容易脱落或者松动,影响传感器的寿命和传感性能;基于法拉第磁致旋光效应,利用磁光晶体的磁旋效应实现传感,但是该方法受环境误差和偏振误差影响较大^[9];基于光纤光栅的磁致应变敏感特性,结合悬臂梁进行磁场探测,此种方法易受干扰,灵敏度不高;基于磁流体的光学折射率磁致调节特性实现传感,磁流体的填充和封装比较困难,但是由于磁流体没有机械磨损,且没有可动部件,可有效提高传感器的灵敏度和寿命,已成为近几年的研究热点^[11-15]。

本文首先对基于磁流体的光纤磁场传感技术的研究状况和进展进行综述,并依据不同的传感机理进行分类:基于干涉机理的光纤磁场传感器^[11-13,16-19]、基于光纤光栅干涉型的磁场传感器^[20-27]、基于倏逝波机

收稿日期:2020-05-15。

基金项目:浙江省自然科学基金(NO.LY18F050008)资助。

作者简介:刘玉婵(1996—),女,甘肃天水人,硕士研究生,现就读于中国计量大学光学与电子科技学院电子科学与技术专业,主要研究方向是光纤传感。在校期间申请了3项基于磁流体的光纤磁场传感器的专利,并多次获得研究生一等奖奖学金。



理的光纤微结构磁场传感器^[28-46]、基于表面等离子体共振机理的磁场传感器^[47-51]和基于光子带隙效应机理的磁场传感器^[52-54];然后对不同磁流体磁场传感器的优、缺点进行技术评述和比较。

1 基于干涉机理的光纤磁场传感器

1.1 基于法布里-珀罗(F-P)干涉机理

F-P干涉仪是一种多光束、反射型的干涉仪,其与磁流体相结合可制作成一种测量磁场的磁传感器。磁流体在磁场的作用下折射率发生变化,并将折射率的变化反应到F-P腔上,使得F-P腔长发生变化,因此通过测量F-P传感结构输出光波长的变化就可以获得被测磁场的大小。2012年,ZhaoY等人^[11]提出一种基于F-P干涉机理的磁流体填充空芯光子晶体光纤(HC-PCF)的磁场传感器,测得室温下50~150 Oe范围内传感器的磁场灵敏度为33 pm/Oe。2014年,东北大学王丹对Lv R Q等人提出的磁场传感器的结构进行了改进^[12-13],利用1根光纤光栅代替了其中1根单模光纤(如图1所示),解决了温度和磁场交叉敏感的问题,提高了磁场传感器的测量准确度,测得磁场和温度灵敏度分别为34 pm/Oe和0.013 nm/℃。

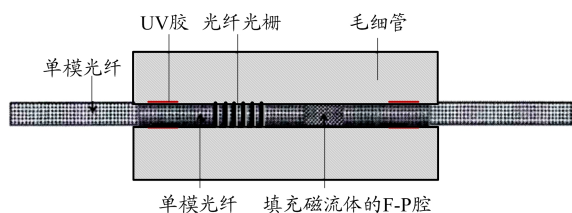


图1 带有温度补偿的结构

1.2 基于模式干涉机理

对于基于模式干涉机理的光纤磁场传感器,目前的相关研究比较多,如锥形结构的传感器、单模—细芯—单模和单模—多模—单模结构的传感器等都属于模式干涉机理的传感器。通过对光纤进行熔融拉锥处理或者制作偏芯结构,使模场失配,从而纤芯基模在熔接面处激发高阶模式,在第二个熔接面处又发生模式耦合,这种基于纤芯基模和高阶包层模式的干涉,其本质上也是一种马赫-曾德尔干涉,因此基于模式干涉机理的光纤磁场传感器仍然是一种透射型的传感器。

2014年,Azam Layeghi等人^[17]在锥形光纤的外面涂覆一层磁流体并密封在毛细管中,测得磁场灵敏度为-71.7 pm/Oe,这种传感探头可以做得很小,但是机

械强度比较低。同年,Shengli Pu等人^[18]提出一种带有锥形接头的传感器,其结构如图2所示,测得0~160 Oe范围内磁场灵敏度为32.53 pm/Oe。2016年,浙江大学张良^[19]利用包层腐蚀的细芯光纤与磁流体结合的传感探头实现了磁场测量,测得磁场和温度灵敏度分别为128 pm/Oe和12.23 pm/℃。

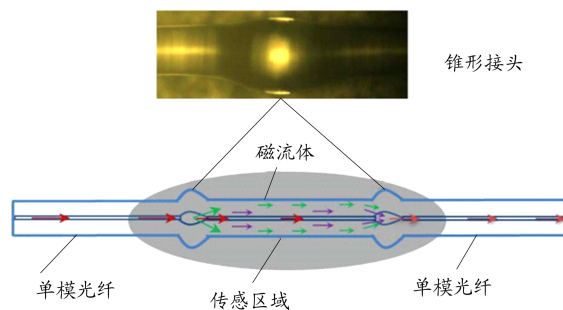


图2 带有锥形接头的传感器

本文对基于不同干涉机理的光纤磁场传感器的磁场灵敏度和测量范围以及磁场测量机理做了对比,如表1所示。对于磁场传感器的测量机理,主要是通过测量波长的变化实现的;对于传感探头的封装,一般使用石英玻璃毛细管实现封装;对于一些环状结构则使用有机玻璃材料实现传感探头的封装。目前,磁流体主要通过毛细作用实现填充。

表1 基于不同干涉机理的光纤磁场传感器的传感性能比较

干涉结构	灵敏度 /(pm·Oe ⁻¹)	测量范围 /Oe	测量机理	封装方法
F-P腔干涉	33~43.1	0~400	波长漂移	石英玻璃毛细管
模式干涉	47.8~128	0~440	波长漂移	石英玻璃毛细管

2 基于光纤光栅干涉型的磁场传感器

光纤光栅是一种由光纤纤芯的折射率周期性调制而形成的器件结构,常见的光纤光栅有光纤布喇格光栅(FBG)、长周期光纤光栅(LPFG)和倾斜光纤光栅(TFBG)。

2.1 FBG 磁场传感器

基于FBG的传感器是一种反射型的传感器,FBG的反射波长满足 $\lambda=2n_{\text{neff}}^{\text{co}}\Lambda$,其中 $n_{\text{neff}}^{\text{co}}$ 是纤芯基模的有效折射率, Λ 是光栅的周期。当包层厚度减小到一定程度时, $n_{\text{neff}}^{\text{co}}$ 受外界环境折射率的影响,因此处于磁流体环境中的传感器的反射波长便会受外界磁场的调制。2019年,梁星等人^[20]提出了一种磁流体包覆薄包

层 FBG 的磁场传感器,测得在 5~20 mT 范围内磁场灵敏度为 3.49 pm/Oe。同年,候元萌等人^[21]提出一种基于磁流体和双芯光纤的磁场和温度双参量测量系统,采用聚四氟乙烯对其进行封装来提高传感器对温度的灵敏度,利用 FBG 的高反射特性实现温度的测量。

2.2 LPFG 磁场传感器

LPFG 是一种长周期的光纤光栅器件,其周期通常为几十微米到几百微米,耦合机理是前向传输的纤芯基模与前向传输的各阶包层模之间的耦合,当 LPFG 处于磁流体环境中时,可以利用磁流体的可调折射率特性测量外界磁场的大小。2011 年,邬林等人^[22]制作了一种磁场传感器,测得磁场灵敏度为 3.1 pm/Oe,该传感器采用有机玻璃材料实现传感探头和磁流体的封装,易于制作、结构简单。

对于如何提高磁场传感器的灵敏度和测量范围一直是磁场传感器研究的一个热点问题。2012 年,祖鹏等人^[23]提出了一种磁流体和微结构光纤相结合的磁场传感器,这种传感器实现了温度补偿,但选用的磁流体浓度较高。2016 年,吴磊等人^[24]使用低浓度的磁流体,提出了一种微结构 LPFG 和单模 LPFG 相结合的磁场传感探头,采用毛细管将其和磁流体进行封装。由于该传感器的 2 个谐振峰向相反方向移动,可以实现磁场和温度的双参量测量,但如果不考虑温度的影响,则该传感器会具有更大的磁场灵敏度。2017 年,Zhengtian Gu 等人^[25]提出的传感器是由包层腐蚀的 LPFG 外面包覆一层磁流体组成,并封装在毛细管中。经过包层腐蚀的 LPFG 在光谱仪(OSA)中可以观察到双峰,并且随磁场的增加双峰向相反的方向移动。根据双峰波长的间隔可以实现磁场的测量,测得在 0~120 Oe 范围内磁场灵敏度为 0.0408 nm/Oe。该传感器结构简单、灵敏度高,在一定程度上也可以实现磁场和温度的同时测量,但是相应地会降低磁场灵敏度。

2.3 TFBG 磁场传感器

TFBG 的纤芯折射率条纹在纤芯轴向方向呈倾斜状态。由于 TFBG 的光栅周期与 FBG 的周期相当,且光栅呈倾斜状态分布,所以 TFBG 不仅可以向前向传播的纤芯基模的光耦合到后向传播的纤芯基模,而且将前向传播的纤芯基模耦合到后向传播的包层模。TFBG 的布喇格反射波长 λ_B 和第 i 阶包层模的共振波长 $\lambda_{cl,i}$ 满足的相位匹配条件可以表示为: $\lambda_B = 2n_{eff}^{co} \Lambda / \cos \theta$, $\lambda_{cl,i} = (n_{eff}^{co} + n_{eff}^{cl,i}) \Lambda / \cos \theta$, 其中 θ 是 TFBG 平面相对于光纤轴的倾角, $n_{eff}^{cl,i}$ 为第 i 阶包层模的有效折

射率。TFBG 对外界环境折射率敏感,所以在传感应用中比普通光纤光栅灵敏度更高。2013 年,Zheng J 等人^[26]提出一种 TFBG 结构和磁流体相结合的磁场传感器,由于 $n_{eff}^{cl,i}$ 对磁流体折射率敏感, n_{eff}^{co} 和 $n_{eff}^{cl,i}$ 对温度敏感,且对温度灵敏度相同,因此该传感器可以实现磁场和温度的双参量测量。通过检测包层模式共振的消光变化可测量 0~196 Oe 范围内的磁场;通过检测纤芯模式波长的漂移测量温度的变化,测得温度灵敏度为 8.4 pm/°C。2015 年,杜磊^[27]提出了类似结构的磁场传感器,并进行了实验验证。

综上所述,基于光纤光栅结构的光纤磁场传感器的结构简单,易于与其它种类光纤相结合,可以扩展光纤磁场传感器的应用范围。例如,利用 FBG 对温度敏感的特性,将其与基于磁流体的光纤磁场传感器相结合,在实现磁场测量的同时可以实现温度的测量,既解决了磁场测量时温度和磁场交叉敏感的问题,又可以将其应用于温度测量领域,有效地提高了传感器的利用率。目前,主要采用石英玻璃毛细管对基于光纤光栅结构的光纤磁场传感器进行封装,然后利用紫外胶或者环氧树脂胶将其密封;再通过毛细作用实现磁流体的填充,或者使用微注射器进行填充。

3 基于倏逝波机理的光纤微结构磁场传感器

微结构光纤作为一种新型光纤,具有许多独特的特性。基于倏逝波传感机理,结合微结构光纤和磁流体的磁场传感器代表了光纤磁场传感器的一个重要研究方向,本文着重分析锥形光纤和 D 型光纤这 2 种结构的光纤磁场传感器。

3.1 基于锥形光纤磁场传感器

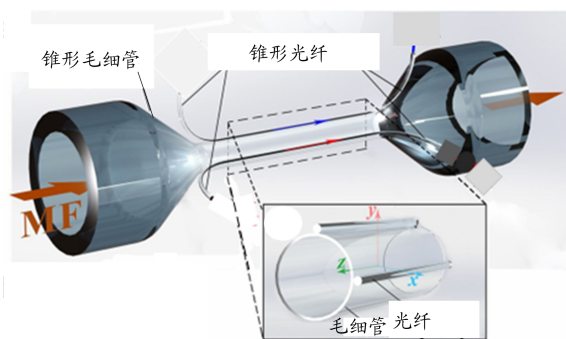
基于锥形光纤的光纤环谐振器因其品质因数高、传输损耗低、结构紧凑和简单的制造工艺而备受关注。由于锥形光纤尺寸小,从锥形光纤泄漏的倏逝波对外部介质的折射率变化敏感,近年来对基于磁流体的锥形光纤磁场传感器的研究也越来越多,其传感机理本质上是基于模式干涉效应的一种传感器,其原理如下:通过对光纤进行熔融拉锥处理,从而使模式失配,在锥形处发生模式的干涉;利用磁流体在磁场作用下折射率改变的特性,通过测量波长的漂移量从而获得磁场的信息。针对不同锥形结构的磁场传感器,其传感性能不一。表 2 为近年来对锥形结构的磁场传感器的研究现状。

2019 年,He Tian 等人^[42]提出一种锥形结构的矢

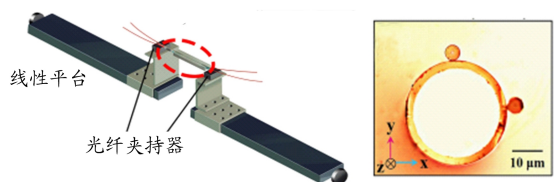
表 2 锥形光纤磁场传感器的传感性能

光纤类型		灵敏度	参考文献
环形结构光纤		32.4 pm/Oe	[28~29]
非对称锥形光纤		56 pm/Oe	[30~31]
		26 pm/Oe	[32]
对称锥形光纤	单模光纤—锥形无芯光纤—单模光纤	18.7 pm/Oe	[33]
	单模光纤—锥形光子晶体光纤—单模光纤	16.04 pm/Oe	[34]
	单模光纤—锥形微结构光纤—单模光纤	11.79 pm/Oe	[35]
	单模光纤—锥形双模光纤—单模光纤	98.2 pm/Oe	[36]
	多模光纤—锥形单模光纤—多模光纤	-0.2886 nm/Oe	[37]
	高双折射光纤—锥形高双折射光纤—高双折射光纤	21.4 pm/Oe	[38]
	双 S 锥形光纤	0.11 dB/Oe	[39]
	长锥形光纤	309.3 pm/Oe	[40]
	短锥形光纤	7 pm/Oe	[41]

量磁场传感器,其结构如图 3 所示。该传感器是由毛细管和 2 根单模光纤以及磁流体组成,2 根单模光纤形成 2 个传输通道。由于 2 个传输通道的方向相对于磁场的方向不一致,所以外加磁场下输出光波长的位



(a) 传感器结构和锥形区域放大图



(b) 熔融拉锥的平台

(c) 截面放大图

图 3 锥形结构的矢量磁场传感器结构图

移向相反方向移动,根据波长的漂移量的大小就可以获得磁场的大小,测得磁场灵敏度为 24.4 pm/Oe。在磁场大小一定时,由于磁性纳米颗粒总是沿着磁场方向排列,因此改变磁场方向和传输通道之间的夹角,输出光波长也会发生位移,从而获得磁场的方向信息。该传感器既可以测量磁场大小又可以测量磁场的方向,但是实际测量中一个传感器仅能用于测量磁场的大小或方向,不能同时测得磁场大小和方向。

3.2 基于 D 型光纤的磁场传感器

D 型光纤结构的传感器本质上也是一种模式干涉传感器,与锥形结构的光纤相比,D 型光纤结构的磁场传感器的机械强度较好,且 D 型光纤具有较高的倏逝场,可以有效地提高传感器的灵敏度。2012 年,Lei Gao 等人^[43]提出一种基于磁流体和 LPFG 的 D 型光纤磁场传感器实现了磁场测量,利用 D 型光纤的高倏逝场可有效提高磁场灵敏度,测得磁场灵敏度为 176.4 pm/Oe。2017 年,Yu Ying 等人^[44]提出一种基于磁流体薄膜和 TFBG 的 D 型光纤磁场传感器,利用 OPTIWAVE 软件仿真得到在 30~270 Oe 的范围内磁场灵敏度为 -0.18 nm/Oe。2018 年,Yue Dong 等人^[45]提出一种基于无芯—D 型光纤—无芯结构的光纤磁场传感器,利用磁流体在外界磁场和温度作用下对传感器的调制,可以通过测量输出光波长的位移量获得磁场和温度的大小,测得磁场和温度灵敏度分别为 99.68 pm/Oe 和 77.49 pm/℃。

基于倏逝波机理的微结构光纤磁场传感器仍然采用石英玻璃毛细管实现封装,利用毛细作用或者微注射器的压力作用实现磁流体的填充。基于锥形光纤和 D 型光纤的磁场传感器,其本质都是基于模式干涉效应的传感器,且二者的磁场测量机理都是通过波长的漂移量来实现的。对于基于锥形光纤的磁场传感器,目前其相关研究比较多,囊括了各种结构,且传感探头可以做得很小,能实现狭小区域的磁场测量,但是其机械强度不高;对于基于 D 型光纤的磁场传感器,其机械强度较好,易于与其它光纤相结合,可实现传感性能较好的磁场传感器。

4 基于表面等离子体共振机理的磁场传感器

表面等离子体共振是光与金属相互作用的结果,当光传播时产生的倏逝波与表面等离子体波相互匹配发生共振时会产生一个共振吸收峰,在外界磁场作用下磁流体的折射率变化会使共振峰发生变化,通过测量共振峰的位移就可以获得磁场的变化。近几年,

国内外学者对基于表面等离子体共振和磁流体相结合的光纤磁场传感器的相关研究较多,并且大多数传感器可以实现磁场和温度的双参量测量,也有实验验证可以进行磁场方向的测量^[46-49]。2019年,Zhou X等人^[50]提出了一种基于表面等离子共振的单模—无芯—单模结构的光纤磁场传感器,无芯光纤外表面镀一层银膜,并将该结构密封在填充有磁流体的毛细管中,通过测量共振峰的位移可以测量磁场的大小,测得在0~349 Oe范围内磁场灵敏度为303 pm/Oe。同年,Eva Rodríguez-Schwendtner等人^[51]提出一种基于磁流体和双层镀膜的锥形光纤结构的传感器,分析验证了磁场方向、磁流体的浓度和类型对磁场灵敏度的影响,为实现高灵敏度传感器的研究提供了一定的理论基础。

基于表面等离子体共振机理的光纤磁场传感器,其灵敏度高,可以达到纳米量级。目前,对基于表面等离子体共振机理的磁场传感器的研究大多都是基于理论仿真,因为金属镀膜是该类传感器制作过程中的一个难点和重点。虽然化学镀膜法和真空蒸镀膜法可以实现光纤上的金属镀膜,但是其镀膜质量不理想且成本高,因此必须研发适用于光纤表面和端面的镀膜工艺,以改善传感器的传感性能。

5 基于光子带隙效应机理的磁场传感器

基于光子带隙效应机理的磁场传感器主要采用光子晶体光纤实现磁场传感。2014~2020年,国内外的研究者对磁流体填充的光子晶体光纤在磁场作用下的性能进行仿真研究^[52-54],根据耦合模理论,通过在包层空气孔中注入磁流体和温敏液体,计算出光纤的共振波长,从而得到磁场的变化,其灵敏度最高可达799.07 pm/Oe。2020年,Erlai Wang等人^[55]在微结构光纤的空气孔中注入磁流体和温敏液体,通过理论仿真得到磁场和温度灵敏度分别为18 nm/Oe和113.1 nm/°C。此类传感器灵敏度高、体积小,可用于制造高灵敏度便携式设备,为光纤传感器的研究提供了新思路和研究方向。

6 结束语

本文综述了国内外基于磁流体的光纤磁场传感技术的研究进展,对不同磁场传感器的传感机理和优、缺点进行评述,重点分析了传感器的灵敏度、传感探头的封装和磁流体的填充3个方面。对于传感器的灵敏度,与基于其它机理的光纤磁场传感器相比,基于表面等离子体共振机理的光纤磁场传感器灵敏度

更高,可以达到纳米量级;对于传感探头的封装,主要采用毛细管或有机玻璃材料实现;对于磁流体的填充,则主要利用毛细管的毛细作用或者注射器的压力作用实现,或者制成磁流体薄膜。

目前,基于磁流体的光纤磁场传感总体技术尚处于实验室研究阶段,仍存在如下需要完善之处:

①光纤微加工工艺复杂、成本较高。由于传统的半导体平面微加工工艺不适用于光纤的三维微加工,因此必须研发适用于光纤三维微加工的工艺手段,通常采用的光纤微加工工艺为聚焦等粒子束或飞秒激光微加工^[56-57];

②对光纤微结构的磁流体有效填充是该类传感器技术的难点,也在很大程度上决定了传感器的性能优劣,需要开发更加有效且低成本的磁流体填充手段^[58];

③磁流体光纤磁场传感器的封装技术需要加强和完善,封装技术决定了传感器的性能优劣和使用寿命,也决定了传感器研发成本的高低^[23];

④需要开发性能更加优良的新型磁流体材料。磁流体材料性能的优劣是光纤磁场传感器的关键要素,目前在用的磁流体材料粘度较高且响应时间较慢,不易于填充和封装,所以需要开发新型的磁流体材料,使之有更快的动态响应时间和适当的粘度,并易于填充和封装^[43]。

由于磁流体的温度特性,基于磁流体的光纤磁场传感器对温度具有一定的灵敏度,因此在进行磁场测量时会产生温度和磁场交叉敏感的问题。为了解决这种问题,许多研究报道采用一定的方法实现磁场和温度的双参量测量,如光纤结构选用光纤光栅或者传感结构中注入温度敏感的液体,从而实现温度的测量,也可以采用温度敏感的封装材料以提高温度灵敏度。因此,对于磁流体磁场传感器,应该不仅仅限于磁场的测量,其功能也可以扩展到温度测量领域,实现传感器的高利用率。

磁流体不仅具有磁致折射率可调特性和温度特性,同时磁流体还具有固体磁性物质的磁特性,其纳米颗粒沿着磁场方向排列,因此磁场的方向对磁场大小的测量有一定的影响。目前,关于磁场测量的研究多集中于对磁场大小的测量,而对磁场方向测量的相关研究较少。考虑到实际环境和实验室测量条件的差异性,实验室测量时先固定磁场方向然后再进行磁场大小的测量,但是实际测量时磁场的大小和方向都是未知的,因此实际测量时还必须考虑磁场的方向。由于磁流体的磁特性,虽然目前大多数的研究中对磁场

方向的研究和分析比较缺乏,但是所研究的磁流体磁场传感器对磁场方向都具有一定的灵敏度,希望未来的研究可以将磁场的方向灵敏度作为衡量传感器传感性能的一个重要的指标进行分析,以扩大磁流体传感器在磁场测量领域的应用范围。

参考文献:

- [1] 肖红雨,周万松. 磁场生物效应的国内进展 [J]. 中国理疗杂志, 1999,3(1):6-9.
- [2] 周洲. 磁流体聚集对磁性药物靶向的影响[D]. 北京:中国科学院研究生院(电工研究所),2006:3-15.
- [3] GITTER K, ODENBACH S. Quantitative targeting map based on experimental investigations for a branched tube model in magnetic drug targeting [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323: 3038-3042.
- [4] RIPKA P. Advances in Fluxgate sensors [J]. Sensors and Actuators A, 2003(106): 8-14.
- [5] HAUSER H, HOCHREITER J, STANGL G, et al. Anisotropic magnetoresistance effect field sensors [J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2013(215/216): 788-791.
- [6] PAUN M A, SALLESE J M, KAYAL M. Offset and drift analysis of the hall effect sensor [J]. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2012, 7(3): 883-891.
- [7] YANG M, DAI J, ZHOU C, et al. Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20777-20782.
- [8] 刘吉延,斯永敏,李智忠,等. 采用超磁致伸缩薄膜的光纤磁场传感器[J]. 光电技术应用,2004,25(3):238-241.
- [9] 朱俊. 基于磁光晶体的光纤磁场矢量测量研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013:38-50.
- [10] 刘剑. MEMS 悬臂梁磁场传感器与谐振悬臂梁电磁驱动技术[D]. 上海:中国科学院上海微系统与信息技术研究所,2006:23-49.
- [11] ZHAO Y, LV R, YING Y, et al. Hollow-core photonic crystal fiber Fabry-Perot sensor for magnetic field measurement based on magnetic fluid [J]. Opt Laser Techno, 2012, 44(4): 899-902.
- [12] 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.
- [13] 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,2014:17-26.
- [14] 李德才. 磁性液体密封理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社,2003: 109-152.
- [15] 赵勇,董俊良,陈菁菁,等. 磁流体的光学特性及其在光电信息传感领域中的应用[J]. 光电工程,2009,36(7):126-131.
- [16] 祖鹏,向望华,白扬博,等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. 光学学报,2011,31(8):57-61.
- [17] AZAM L, HAMID L, ORLANDO F. Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(9): 1904-1907.
- [18] SHENGLI P, SHAOHUA D. Magnetic field sensing based on magnetic-fluid-clad fiber-optic structure with up-tapered joints [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 1-6.
- [19] 张良. 基于磁流体的光纤磁场传感研究[D]. 杭州:浙江大学,2016: 16-52.
- [20] 梁星,杨武海,刘鑫,等. 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.
- [21] 侯元萌,葛海波,李彩虹,等. 基于 MF 与双芯的光纤磁场传感系统温度补偿研究[J]. 光通信技术,2019,43(9):31-34.
- [22] 郭林,周次明,丁立,等. 基于磁流体与长周期光纤光栅的磁场传感研究[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(9):24-27.
- [23] ZU P. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber[J]. IEEE Photon, 2012, 4(2): 491-498.
- [24] 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.
- [25] GU Zhengtian, LING Qiang, LAN Jinlong, et al. High sensitive LPFG magnetic field sensor based on dual-peak resonance [J]. Optics and Laser Technology, 2017(96): 249-253.
- [26] ZHENG J, DONG X Y. Magnetic field sensor using tilted fiber grating interacting with magnetic fluid [J]. Optics express, 2013, 21 (15): 17863-17868.
- [27] 杜磊. 基于特殊光纤结构和磁流体的磁场传感研究[D]. 西安:西北工业大学,2015:9-17.
- [28] LI X L, DING H. All-fiber magnetic-field sensor based on microfiber knot resonator and magnetic fluid[J]. Opt. Lett., 2012, 37(24): 5187-5189.
- [29] ZHANG Yanan, ZHU Naisi, GAO Peng, et al. Magnetic field sensor based on ring WGM resonator infiltrated with magnetic fluid [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020(493): 1-6.
- [30] MIAO Yinping, WU Jixuan, LIN Wei, et al. Magnetic field tunability of optical microfiber taper integrated with ferrofluid [J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29914-29920.
- [31] DENG Ming, LIU Danhui, LI Decai. Magnetic field sensor based on asymmetric optical fiber taper and magnetic fluid [J]. Sensors and Actuators A, 2014 (211): 55-59.
- [32] DONG Shaohua, PU Shengli, WANG Haotian. 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.
- [33] MIAO Yinping, WU Jixuan, LIN Wei, et al. Magnetic field tunability of square tapered no-core fibers based on magnetic fluid [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4600-4604.
- [34] ZHAO Yong, WU Di, LYU Riqing. Magnetic field sensor based on photonic crystal fiber taper coated with ferrofluid [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 26-29.
- [35] DENG Ming, HUANG Can, LIU Danhui. All fiber magnetic field sensor with ferrofluid filled tapered microstructured optical fiber interferometer[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20668-20674.
- [36] SUN Bing, FANG Fang, ZHANG Zuxing, et al. High-sensitivity and low-temperature magnetic field sensor based on tapered two-mode fiber interference[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1311-1314.
- [37] CHEN Hao, SHAO Zhihua, ZHANG Xuan, et al. Highly sensitive

- magnetic field sensor using tapered Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018(107): 78-82.
- [38] AZAM L, HAMID L. Magnetic field vector sensor by a nonadiabatic tapered Hi-Bi fiber and ferrofluid nanoparticles [J]. Optics and Laser Technology, 2018(102): 102184-102190.
- [39] ZHANG Xu, LIU Bo, ZHANG Hao, et al. A magnetic field sensor based on a dual S-tapered multimode fiber interferometer [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(7): 1-7.
- [40] MA Zelong, MIAO Yinping, LI Yi, et al. A highly sensitive magnetic field sensor based on a tapered microfiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1-8.
- [41] LUIS A. HERRERA P, JOSEPH W, et al. Magnetic field sensing based on bi-tapered optical fibers using spectral phase analysis [J]. Sensors, 2017, 17(10): 1-10.
- [42] HE Tian, YU Xiaosong, LI Yanzeng, et al. Fiber-optic vector magnetic field sensor based on mode interference and magnetic fluid in a two-channel tapered structure [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1-9.
- [43] GAO L, ZHU T, DENG T, et al. Long-period fiber grating within d-shaped fiber using magnetic fluid for magnetic-field detection [J]. Photonics Journal, 2012, 4(6): 2095-2104.
- [44] YU Ying, ZHANG Rui, SI Guangyuan, et al. D-shaped tilted fiber Bragg grating using magnetic fluid for magnetic field sensor [J]. Optics Communications, 2017(405): 228-232.
- [45] DONG Yue, WU Beilei, WANG Muguang, et al. Magnetic field and temperature sensor based on D-shaped fiber modal interferometer and magnetic fluid [J]. Optics and Laser Technology, 2018(107): 169-173.
- [46] LIU Hai, LI Hongwei, WANG Qing, et al. Simultaneous measurement of temperature and magnetic field based on surface plasmon resonance and Sagnac interference in a D-shaped photonic crystal fiber [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018(50): 1-11.
- [47] JIANG Zhupeng, DONG Jiangli, HU Shiqi, et al. High-sensitivity vector magnetic field sensor based on side-polished fiber plasmon and ferrofluid [J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4743-4746.
- [48] YU Ying, HU Nan, SI Guangyuan, et al. Magnetic field and temperature sensor based on D-shaped photonic crystal fiber [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2019(176): 309-314.
- [49] 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): 251-258.
- [50] ZHOU X, LI X G, LI S G, 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.
- [51] RODRIGUEZ-SCHWENDTNER E, MARIA-CRUZ N, DIAZ-HERRERA N, et al. Advanced plasmonic fiber-optic sensor for high sensitivity measurement of magnetic field [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7355-7364.
- [52] LI J, WANG R, WANG J, et al. Novel magnetic field sensor based on magnetic fluids infiltrated dual-core photonic crystal fibers [J]. Opt. Fiber Technol., 2014(20): 100-105.
- [53] GANGWAR R K. Magnetic field sensor based on selectively magnetic fluid infiltrated dual-core photonic crystal fiber [J]. Opt. Eng., 2016, 55(2): 0261111-0261116.
- [54] MOUTUSID, VINOD KMMAR S. Magnetic fluid infiltrated dual core photonic crystal fiber based highly sensitive magnetic field sensor [J]. Optics and Laser Technology, 2018(106): 61-68.
- [55] WANG Erlei, PENG Cheng, JIA Li, et al. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2020(55): 1-6.
- [56] ALESSANDRO R, ENRICO D L, FILIPPO P, et al. Laser micromachining of tapered optical fibers for spatially selective control of neural activity [J]. Microelectronic Engineering, 2018(192): 88-95.
- [57] LEE ChengLing, YANG Lu, CHEN ChienHsing, et al. Microhole-pair hollow core fiber Fabry-Perot interferometer micromachining by a femto-second laser [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020(302): 1-7.
- [58] LUO Yan, LEI Xueqin, SHI Fuquan, et al. A novel optical fiber magnetic field sensor based on Mach-Zehnder interferometer integrated with magnetic fluid [J]. Optik, 2018(174): 252-258.