

## 激光与光电子学进展

## 基于磁流体包覆的长周期光纤光栅磁场传感器

吕康康<sup>1</sup>, 刘兴<sup>2</sup>, 姜晨<sup>1</sup>, 王华<sup>2</sup>, 孙欣<sup>2</sup>, 易璐<sup>2</sup>, 李路明<sup>2</sup>, 彭亮<sup>2</sup>, 牟成博<sup>1</sup>, 刘云启<sup>1\*</sup><sup>1</sup>上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;<sup>2</sup>国网江西省电力有限公司信息通信分公司, 江西 南昌 330096

**摘要** 光纤磁场传感器具有灵敏度高、体积小、耐腐蚀以及抗电磁干扰等优点, 弥补了传统磁场传感器的不足, 在军事、工业、电网等多个领域发挥着重要作用。使用二氧化碳激光器分别在标准通信单模光纤和光敏光纤上制备了两种类型的长周期光纤光栅(LPFG), 将 LPFG 浸入磁流体中制备磁场传感器。当施加外部磁场时, LPFG 的谐振波长会发生偏移。当磁场强度在 1.6~25.5 mT 范围内变化时, 可达到的最大磁场灵敏度为 126.5 pm/mT。该传感器在磁场或电场系统中具有潜在的应用。

**关键词** 光栅; 长周期光纤光栅; 光纤传感; 磁流体; 磁场传感器

**中图分类号** TN253

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/LOP202259.2305001

## Magnetic Field Sensor Based on Long-Period Fiber Grating Packaged by Magnetic Fluid

Lü Kangkang<sup>1</sup>, Liu Xing<sup>2</sup>, Jiang Chen<sup>1</sup>, Wang Hua<sup>2</sup>, Sun Xin<sup>2</sup>, Yi Lu<sup>2</sup>, Li Luming<sup>2</sup>,  
Peng Liang<sup>2</sup>, Mou Chengbo<sup>1</sup>, Liu Yunqi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup>State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Information & Telecommunication Company, Nanchang 330096, Jiangxi, China

**Abstract** The optical fiber magnetic field sensors have the advantages of high sensitivity, small size, corrosion resistance, and anti-electromagnetic interference, overcoming the drawbacks of the traditional magnetic field sensor, and play a crucial role in many industries, including military, business, and power grid. Two different types of long-period fiber gratings (LPFGs) have been fabricated on both traditional single-mode fiber and photosensitive fiber using a carbon dioxide laser. The magnetic field sensors can be created by submerging the LPFG into the magnetic fluid. The resonance wavelength of the LPFG will be shifted when being applied to an external magnetic field. The attained greatest sensitivity of the wavelength shift was 126.5 pm/mT when the magnetic strength varies in the range of 1.6~25.5 mT. The proposed magnetic fiber optic sensor has potential applications in magnetic or electric field systems.

**Key words** gratings; long-period fiber grating; fiber sensing; magnetic fluid; magnetic field sensor

## 1 引言

随着新型材料的研发以及商业化应用, 基于新型纳米材料的磁场传感器得到了飞速的发展, 在智能电网、医药医疗、化学<sup>[1-4]</sup>等领域得到了广泛应用。在智能电网方面, 磁场传感器可以在电力系统中实现地面空间磁场传感等各种磁场安全性检测。尤其是在电力

工业的发展中, 智能电网系统的电磁或漏磁检测十分必要。随着传感技术不断向集成化、智能化的方向发展, 利用电信号进行传感的磁场传感器暴露了体积大、结构复杂、适应力低等缺陷<sup>[5-8]</sup>。例如: 基于磁阻效应制备的特斯拉计, 虽然适合测量强磁场, 但对弱磁场不敏感; 基于法拉第电磁感应制备的磁场传感器, 只适合检测周期变化的磁场。而且这些器件都对电磁环境敏

收稿日期: 2021-10-10; 修回日期: 2021-11-14; 录用日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(62075124)

通信作者: \*yqliu@shu.edu.cn

感,容易引起测量噪声。因此在过去的几十年中,光纤磁场传感器得到了蓬勃发展。

光纤磁场传感器具有抗电磁干扰、体积小、适用于恶劣环境等优势,因此在智能电网的未来发展过程中有着重要的应用。光纤磁场传感器根据传感原理主要分为两种<sup>[9]</sup>,一种是物性型光纤磁场传感器,主要是基于法拉第效应的光纤磁场传感器。在传感系统中,通过线偏振光振动方向的变化来测量磁场强度,由于传统光纤(二氧化硅)的费尔德常数较低,一般需要增加光纤在磁场中的有效长度来提高光纤的费尔德常数,因此外界电磁干扰对精确度有较大的影响。2020年Li等<sup>[10]</sup>提出了一种基于光泵浦原子磁强计的直流电流传感器,此电流传感器具有高精度且在较宽范围内具有高线性度,但设备昂贵且成本较高。

另一种是结构型光纤磁场传感器,通过光纤与磁敏材料(磁致伸缩材料、磁流体等)组成传感头,基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器,可以将光纤光栅直接粘贴在超磁致伸缩棒上,2022年董富宁等<sup>[11]</sup>提出了一种基于磁致伸缩效应和光纤光栅的电流传感器。结果表明,此传感器很大程度上消除了外界温度对灵敏度的影响,但超磁致伸缩棒的长度通常较小,存在着灵敏度低、稳定性差等问题。一般在智能电网系统中需要准确获得设备的电磁或漏磁,这要求传感器对电磁具有高精度度和高灵敏度。2016年Li等<sup>[12]</sup>提出了一种基于双芯光纤(TCF)飞秒激光制备马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的超灵敏磁场传感器,在磁场强度5~9.5 mT的测量范围内,表现出线性响应并且具有20.8 nm/mT的超高灵敏度,但其制备工艺复杂且制备设备昂贵。

磁流体(MF)是一种特殊的纳米材料,磁性纳米颗粒均匀地分散在基液中。由于材料具有磁光特性(如可调折射率、可调双折射等),磁流体可用于磁场传感器领域。长周期光纤光栅(LPFG)可以实现前向传输的纤芯基模与前向传输的各阶包层模式之间的耦合,这种耦合机理使得长周期光栅没有后向反射光,且LPFG具有光纤传感器的优点以及相当高的折射率灵敏度。因此,研究基于长周期光纤光栅和磁流体的高

灵敏度磁场传感器具有重要的应用价值。2015年Zhang等<sup>[13]</sup>提出一种将磁流体与长周期光栅相结合的光纤磁场传感器,在0~7.4 Gs(1 Gs=10<sup>-4</sup> T)的场强范围内,磁场灵敏度可达到0.154 dB/Gs。2021年Li等<sup>[14]</sup>提出了一种U形弯曲单模光纤与磁流体相结合的矢量磁场传感器。结果表明,此磁场传感器最大磁场强度灵敏度为0.517 nm/mT。然而,这些传感器中的大多数磁场灵敏度不高或者具有制备复杂、设备昂贵等缺点。

本文使用二氧化碳激光在普通单模光纤以及光敏光纤上制备了两种类型的LPFG,并将制备的两种LPFG用磁流体进行封装,分别研究了不同磁场下的透射光谱变化,实验测量了1.6~25.4 mT磁场强度范围内光栅磁场传感器谐振波长的变化规律,该研究为光纤磁场传感器的实际工程应用提供了参考。实验结果表明,被磁流体包覆的色散拐点(DTP)的LPFG传感器具有更高的磁场灵敏度,是基于常规长周期光栅传感器灵敏度的近3倍。

## 2 光纤传感器制备

### 2.1 长周期光纤光栅的制备

LPFG的形成机理与很多因素相关,例如:写入激光的波长和能量、光纤掺杂情况、光纤结构、载氢情况等。将LPFG写入光纤时,引入的周期性折射率调制通常是多种光敏机理共同作用的结果。二氧化碳激光写入法可在普通单模光纤(SMF-28)中写入高质量的LPFG,而且无需退火处理,热稳定性也很好,可通过改变二氧化碳激光的扫描周期获得不同传输特性的LPFG<sup>[4,15]</sup>。

本研究使用二氧化碳激光(工作能量和频率分别为0.6 W、5.0 kHz)分别在普通单模光纤(SMF-28)和光敏光纤(PS1250)上制备了两种类型的LPFG。其中LPFG的传感原理参考文献<sup>[16]</sup>。基于普通单模光纤的长周期光纤光栅(SMF-LPFG)周期为345 μm、周期数为120。实验中通过宽带光源(BBS, NKT Photonics, 丹麦)和光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA, 日本)来检测光栅光谱,其透射光谱如图1(a)中黑色实

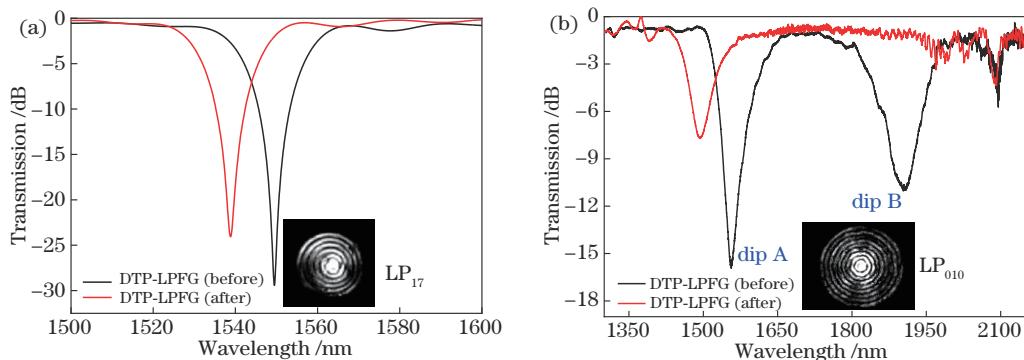


图1 LPFG的透射光谱。(a) SMF-LPFG; (b) DTP-LPFG

Fig. 1 Transmission spectrum of LPFG. (a) SMF-LPFG; (b) DTP-LPFG

线所示,谐振波长为 1550 nm,光栅对比度为 29 dB。为了确认包层模式的阶数,使用红外 CCD 相机和可调谐激光光源测量光栅共振波长处的模场强度分布。图 1(a)中的插图 of SMF-LPFG 的模场分布图,可以确定光栅模式为  $LP_{1,7}$  模。

另外,本文使用二氧化碳激光器在光敏光纤上制备了接近于色散拐点 DTP-LPFG,其光栅周期为  $226\ \mu\text{m}$ 、周期数为 60。透射光谱如图 1(b)中黑色实线所示,两个谐振峰 dip A、dip B 的谐振波长分别为 1556 nm 和 1907 nm,光栅对比度分别为 16 dB 和 11 dB。图 1(b)中的插图 of DTP-LPFG 的模场分布图,可以确定光栅模式为  $LP_{0,10}$  模。普通单模光纤在制备过程中,通常会在光纤纤芯留下相当大的残余应力。当光纤的一侧受到二氧化碳激光照射时,强烈的热效应使得纤芯中的残余应力释放,纤芯在照射点的折射率降低,导致包层区域发生额外的非对称折射率变化,从而允许光耦合到非对称包层模式。而在光敏光纤上制备 LPFG 时,二氧化碳激光辐射所需能量远低于在普通单

模光纤上制备 LPFG 的激光所需能量,当激光能量足够低时,折射率变化只发生在纤芯中,由此产生的折射率分布是对称的<sup>[4]</sup>,所以其模式称为对称模式。

## 2.2 LPFG 的磁流体纳米颗粒封装

磁流体是一种特殊的纳米材料,是由磁性纳米颗粒(直径约为 10 nm)和表面活性剂组成的胶体,磁性纳米颗粒均匀地分散在基液(有机溶剂或水)中,广泛应用于光纤磁场检测。在外部磁场作用下,磁流体中的磁性纳米粒子从随机均匀分布变为沿磁场方向聚集并形成链式结构,使得磁流体折射率发生变化。

实验中使用内直径为 2.0 mm 的毛细管对 LPFG 与磁流体进行封装,将制备的 LPFG 水平放置于石英毛细管的中间部分,利用紫外固化胶封装毛细管一端,待其固化后利用注射器将磁流体导入毛细管内,直至填满,施加轴向拉力使得光栅保持伸直状态,用紫外固化胶将毛细管另一端密封,从而得到了封装后的 LPFG,其透射光谱如图 1 中红色实线所示。图 2 为封装后的传感头示意图和实物图。

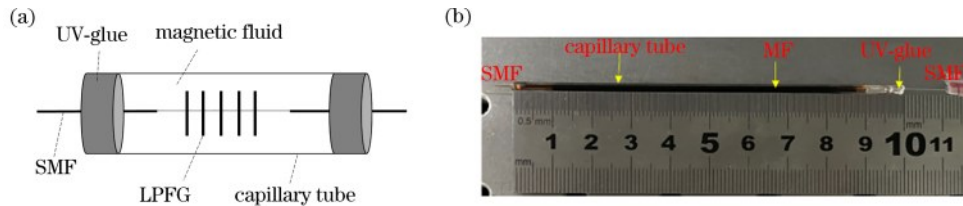


图 2 被磁流体覆盖的 LPFG 磁场传感器。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 2 Magnetic field sensor of LPFG coated with MF. (a) Schematic diagram; (b) physical picture

测量结果表明,对 SMF-LPFG 进行纳米磁流体封装之后,谐振波长向短波移动,从原来的 1550 nm 移动到 1539 nm,对比度从原来的 29 dB 减小为 24 dB。对 DTP-LPFG 进行封装之后:dip A 的谐振波长向短波移动,从原来的 1556 nm 移动到 1493 nm,并且对比度从原来的 16 dB 减小为 8 dB;谐振波长 dip B 则消失,超出光谱仪波长测试范围。

## 3 磁场响应特性

图 3 为磁场测量实验装置示意图。通过光谱分析仪和宽带光源监测传感器的透射光谱。传感器放置在均匀磁场电磁铁的两个磁极中心处,磁场方向垂直于光纤轴,可通过控制驱动电流来调节磁场强度,并用特

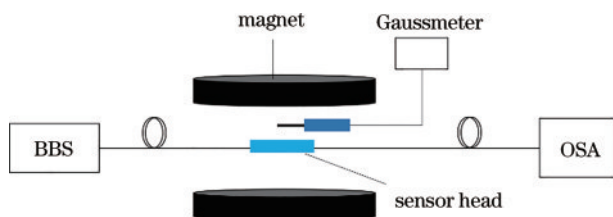


图 3 磁场传感的实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for magnetic field sensing

斯拉磁力计测量传感器所在位置的磁场强度。

根据磁流体的折射率随磁场强度的变化以及 LPFG 谐振波长随外界折射率变化的特性,本文研究了磁场强度在 1.5~33.4 mT 范围内基于 SMF-LPFG 磁场传感器透射光谱与磁场强度的关系,如图 4(a)所示。波长偏移与磁场强度的关系如图 4(b)所示。随着磁场强度的增大,谐振波长首先向短波移动,然后向长波移动,最大波长偏移仅为 1.04 nm。从图 4(c)可以看出:当磁场强度在 1.5~23.5 mT 范围内变化时,光栅中心波长漂移随磁场强度呈线性变化,对波长变化进行线性拟合,其拟合程度  $R^2=0.98745$ ,根据此曲线计算出磁场灵敏度为 47.7 pm/mT;当磁场强度超过 23.5 mT 之后,波长反而向长波移动。这是因为磁流体存在磁饱和现象,当磁场达到磁饱和强度时,磁流体的折射率不随外界磁场的增加而变化。

上述实验结果表明,基于 SMF-LPFG 的磁场传感器灵敏度较低,为了提高磁场灵敏度,本文选用光敏光纤制备 LPFG。选取合适的周期使得长周期光栅位于色散拐点附近,在此色散拐点处 LPFG 有较高折射率灵敏度<sup>[17]</sup>。当磁场强度在 1.6~37.5 mT 范围内变化时,基于 DTP-LPFG 磁场传感器透射光谱与磁场强度的关系,如图 5(a)所示。波长偏移与磁场强度的关系

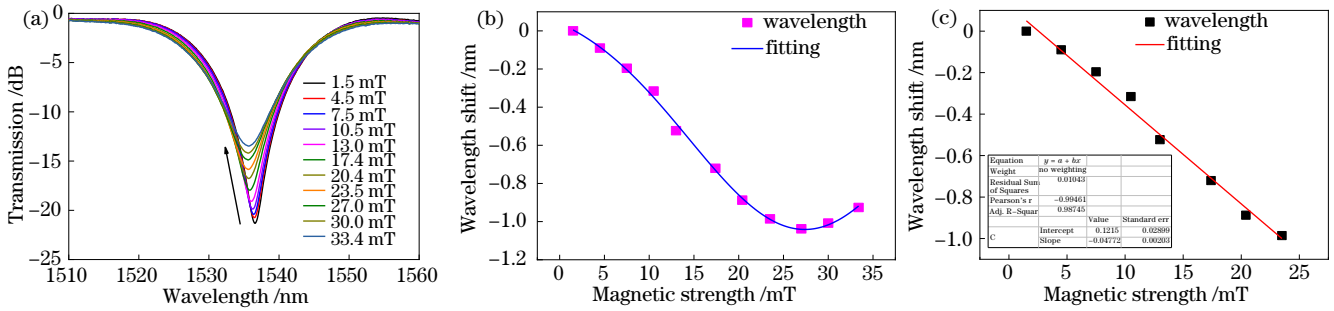


图 4 基于 SMF-LPFG 的磁场传感器的磁场特性。(a) 不同磁场强度下的透射光谱;(b) 不同磁场强度下的波长偏移;(c) 磁场强度与波长偏移的线性关系

Fig. 4 Magnetic field characteristics of the magnetic field sensor based on SMF-LPFG. (a) Transmission spectra under different magnetic field strengths; (b) wavelength shift under different magnetic field strengths; (c) linear relationship between magnetic field strength and wavelength shift

如图 5(b)所示,随着磁场强度的增大,谐振波长首先向短波移动,然后几乎没有变化,最大波长偏移为 2.98 nm。从图 5(c)可以看出:当磁场强度在 1.6~25.4 mT 范围内变化时,光栅中心波长漂移随磁场强度呈线性变化,对波长变化进行线性拟合,其拟合程度  $R^2=0.97502$ ,根据此曲线计算出磁场灵敏度为 126.5 pm/mT;当磁场强度超过 25.4 mT 之后,波长几乎没有偏移。本文分析了图 4(b)和图 5(b)的非线性响应部分可知,当磁场强度大于某个临界值时,磁性颗粒达到磁饱和状态,并不会随着磁场的变化而发生更大的改变<sup>[18]</sup>。在一定磁场范围内,磁流体折射率随磁场强度呈线性变化,而超过这个范围,则呈非线性变化。因此,基于 SMF-LPFG 磁场传感器的磁场强度测量范围为 1.5~23.5 mT,基于 DTP-LPFG 磁场传感

器的磁场强度测量范围为 1.6~25.4 mT。

结果表明,基于 SMF-LPFG 的磁场传感器磁场强度灵敏度较低,仅为 47 pm/mT。基于 DTP-LPFG 的磁场传感器灵敏度约为 SMF-LPFG 磁场传感器的 3 倍。相对于传统的 LPFG, DTP-LPFG 极大地提高了磁场灵敏度。与此同时,查阅文献分别比较了基于 SMF 光纤的 DTP-LPFG 与基于光敏光纤的 DTP-LPFG 折射率灵敏度,根据 2016 年 Colaço 等<sup>[19]</sup>的验证可知,基于光敏光纤的 DTP-LPFG (LP<sub>0,11</sub> 模式) 折射率灵敏度是基于 SMF 光纤的 DTP-LPFG (LP<sub>1,11</sub> 模式) 的 3 倍。因此在两种光纤 (SMF 和光敏光纤) 上制备同类型的 LPFG, 基于光敏光纤的灵敏度高于基于普通单模光纤的灵敏度。

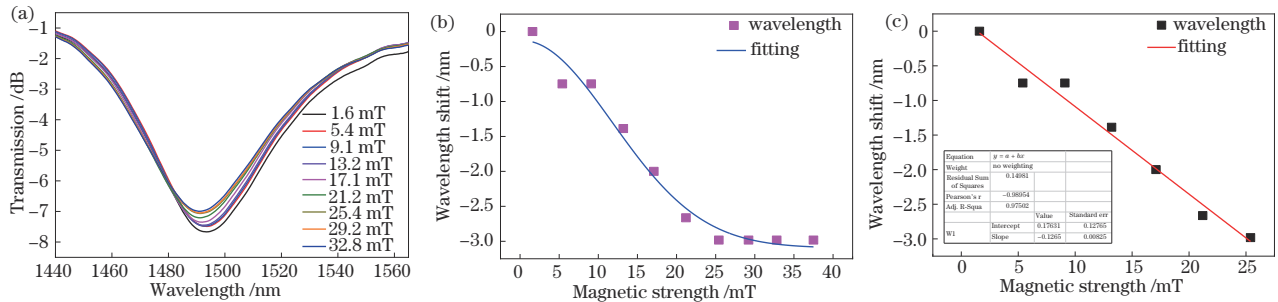


图 5 基于 DTP-LPFG 的磁场传感器的磁场特性。(a) 不同磁场强度下的透射光谱;(b) 不同磁场强度下的波长偏移;(c) 磁场强度与波长偏移的线性关系

Fig. 5 Magnetic field characteristics of the magnetic field sensor based on DTP-LPFG. (a) Transmission spectrum under different magnetic field strengths; (b) wavelength shift under different magnetic field strengths; (c) linear relationship between magnetic field strength and wavelength shift

## 4 结 论

本文使用二氧化碳激光器在普通单模光纤以及光敏光纤上制备了两种类型的 LPFG。将这两种 LPFG 分别浸没在磁流体中,并利用内直径为 2 mm 的毛细管分别封装。然后,对被磁流体包覆的基于 SMF 的 LPFG 进行磁场传感研究,在 1.5~23.5 mT 磁场强度

范围内的磁场灵敏度为 47 pm/mT。对被磁流体包覆的基于色散拐点的 LPFG 进行磁场传感研究,在 1.6~25.4 mT 磁场强度范围内的磁场灵敏度为 126.5 nm/mT。基于 DTP-LPFG 磁场传感器的灵敏度约为基于 SMF-LPFG 磁场传感器的 3 倍,可以达到更高的灵敏度要求。该传感器在电力工业等领域具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] James S W, Korposh S, Lee S W, et al. A long period grating-based chemical sensor insensitive to the influence of interfering parameters[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8012-8023.
- [2] Chiavaioli F, Baldini F, Tombelli S, et al. Biosensing with optical fiber gratings[J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(4): 663-679.
- [3] 唐涛. 电力系统厂站自动化技术的发展与展望[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(4): 92-97.  
Tang T. Development and prospects for the automation technology of power plants and substations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(4): 92-97.
- [4] Liu Y Q, Lee H W, Chiang K S, et al. Glass structure changes in CO<sub>2</sub>-laser writing of long-period fiber gratings in boron-doped single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(7): 857-863.
- [5] Liu C, Shen T, Wu H B, et al. Applications of magnetostrictive, magneto-optical, magnetic fluid materials in optical fiber current sensors and optical fiber magnetic field sensors: a review[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 65: 102634.
- [6] 齐晨英, 徐常平, 白扬博, 等. 基于非绝热型微光纤的高灵敏度磁场传感器[J]. *中国激光*, 2021, 48(24): 2406003.  
Qi C Y, Xu C P, Bai Y B, et al. High-sensitivity magnetic field sensor based on non-adiabatic micro-fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(24): 2406003.
- [7] 荆雅洁, 韩笑笑, 杨濛琨, 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.  
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.
- [8] 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.  
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.
- [9] 王重鑫. 基于磁流体的倾斜光纤光栅磁场传感器[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Wang C X. The tilted fiber Bragg grating (TFBG) magnetic field sensor based on magnetic fluid[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [10] Li G Z, Xin Q, Geng X X, et al. Current sensor based on an atomic magnetometer for DC application[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 031202.
- [11] 董富宁, 杨庆, 罗曼丹, 等. 一种基于磁致伸缩效应和光纤光栅的电流传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0806001.  
Dong F N, Yang Q, Luo M D, et al. A current sensor based on magnetostriction and fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0806001.
- [12] Li Z Y, Liao C R, Song J, et al. Ultrasensitive magnetic field sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer with a magnetic fluid component[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): 197-201.
- [13] Zhang M Y, Dong X Y, Shum P P, et al. Magnetic field sensor based on magnetic-fluid-coated long-period fiber grating[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(6): 065402.
- [14] Li Y X, Pu S L, Hao Z J, et al. Vector magnetic field sensor based on U-bent single-mode fiber and magnetic fluid[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5236-5246.
- [15] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(5): 1320-1327.
- [16] 关静, 胡圣尧. 基于磁流体的光纤光栅电流传感器[J]. *光电子·激光*, 2021, 32(8): 826-832.  
Guan J, Hu S Y. Fiber Bragg grating current sensor based on magnetic fluid[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2021, 32(8): 826-832.
- [17] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 255-266.
- [18] Yang S Y, Chen Y F, Horng H E, et al. Magnetically-modulated refractive index of magnetic fluid films[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(26): 4931-4933.
- [19] Colaço C, Caldas P, del Villar I, et al. Arc-induced long-period fiber gratings in the dispersion turning points[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4584-4590.