

基于MF与双芯的光纤磁场传感系统温度补偿研究

侯元萌,葛海波*,李彩虹,王金豆

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710061)

摘要:针对基于磁流体(MF)的光纤磁场传感方案中温度对光纤谐振波长和MF折射率的干扰问题,提出一种具有温度补偿模块的磁场和温度双参量测量方案。利用布喇格光纤光栅(FBG)对温度敏感而对折射率不敏感的特性,在FBG表面涂覆聚四氟乙烯(PTFE)来实现温度补偿。经系统仿真和理论计算,该方案实现了800 Oe范围内磁场的测量,且与未进行温度补偿的系统相比,磁场测量精度提高81%以上。

关键词:磁流体;双芯光纤;磁场传感器;聚四氟乙烯

中图分类号:TN914 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)09-0031-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on temperature compensation of magnetic field sensing system based on magnetic field and double-core fiber

HOU Yuanmeng, GE Haibo*, LI Caihong, WANG Jindou

(School of Electronic Engineering, University of Xi'an Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: Aiming at the problem that temperature can affect the resonance wavelength of fiber and the refractive index of magnetic fluid (MF) in the fiber magnetic field sensing scheme based on magnetic fluid. A scheme for measuring double parameters, including the MF intensity and the temperature, with temperature compensation module is proposed. By using the characteristic that FBG is sensitive to temperature but insensitive to refractive index, the surface of FBG is coated with polytetrafluoroethylene (PTFE) to realize temperature compensation. By system simulation and theoretical calculation, the measurement of magnetic field in the range of 800 Oe is achieved, and the measurement accuracy of magnetic field increases by 81% than that without temperature compensation system.

Key words: magnetic fluid; twin-core fiber; magnetic field sensor; poly tetra fluoro ethylene

0 引言

近年来基于磁致伸缩材料的磁场传感研究发展迅猛,磁流体(MF)与长周期光纤光栅(LPFG)的结合有效提高了磁场测量精度,但MF与LPFG的温度特性也让测量时温度交叉敏感成为急待解决的问题。2011年,郭林等人^[1]设计了基于MF与LPFG的磁场传感探头,灵敏度达31 pm/mT,但未考虑温度对MF折

射率和LPFG谐振波长造成的影响。2015年,李尧丞等人^[2]对MF与LPFG磁场传感器的温度特性进行理论研究及数值模拟,但未对温度造成的具体影响进行分析。2019年,梁星等人^[3]用MF封装薄包层布喇格光纤光栅(FBG)设计磁场传感器,利用MF的磁光效应结合FBG反射波长随折射率变化漂移特性进行磁场测量,虽对温度有一定的修正,但未能考虑温度对MF折射率的影响,且FBG本身对折射率敏感度不高。本文通过研究温度对MF折射率和LPFG耦合的谐振偏移量的影响,提出一种具有温度补偿模块的磁场和温度双参量测量方案,以实现高灵敏度磁场测量。

1 原理分析

1.1 基于MF和LPFG测量磁场的理论基础

MF是一种具有磁致折变效应的纳米智能材料。

收稿日期:2019-04-17。

基金项目:陕西省教育厅自然科学研究基金项目(2011JM8038)资助。

作者简介:侯元萌(1993-),女,硕士,现就读于西安邮电大学电子工程学院电路与系统专业,主要从事光纤通信与光纤传感的研究。就读本科期间曾获“三好学生”并获二、三等奖学金和“优秀毕业生”称号,就读硕士研究生期间曾获三等奖学金和“互联网+”创新创业大赛校二等奖。



*通信作者:葛海波(E-mail: gehaibo2417@aliyun.com)。

当 MF 受到磁场作用时,其含有的磁性粒子会沿场强方向形成磁链,使其同时具有磁性和流动性,且 MF 的折射率随场强线性变化^[4],其折射率 n_{MF} 用郎之万方程表示为^[5]:

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

其中, H 为外部介质的磁场强度, $H_{c,n}$ 为临界磁场强度, n_s 为 MF 折射率饱和值, n_0 为满足 $H > H_{c,n}$ 时 MF 折射率, α 为拟合系数, T 为外界温度。从式(1)可知,外界温度和磁场大小是影响 MF 折射率的关键因素。

LPFG 对外界环境的折射率敏感,当环境介质折射率发生改变时,谐振波长偏移量 $\Delta\lambda$ 随之产生漂移。当 MF 作为外部介质时,经磁场作用 LPFG 折射率会从 n_{ex} 变为 $n_{ex'}$,由 MF 的磁控折变效应可知 LPFG 折射率和其谐振波长关系为^[5]:

$$\Delta\lambda = \frac{u_x \lambda_0^2 \Lambda}{8\pi^3 n_{cl} r_{cl}^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{ex}^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{ex'}^2}} \right) \quad (2)$$

其中, u_x 是 Bessel 函数 $J_0(\chi)$ 为 m 阶根,且与包层模的阶次成正比, λ_0 为 LPFG 初始谐振波长, r_{cl} 和 n_{cl} 分别为 LPFG 的包层半径和包层折射率, Λ 为 LPFG 周期。从式(2)可知,若外加磁场强度改变^[6],则 MF 折射率改变,且 LPFG 波长随 MF 折射率变化发生偏移,故可通过测量 LPFG 波长的变化 $\Delta\lambda$ 得到外界磁场强度变化。

1.2 系统框图及原理

本文利用 MF 的磁控折射率效应和 LPFG 折射率、温度灵敏度高以及 FBG 反射率高的特性,设计了一种基于 MF 的磁场和温度双参量测量方案,该方案的系统设计如图 1 所示。在非同轴双芯光纤内部分别刻入周期为 1058 nm 的 FBG 和周期为 1540 μm 的 LPFG,外部填充 MF,放大自发辐射(ASE)光源经耦合器进入非同轴双芯光纤。经磁场和温度共同作用,LPFG 发出透射光,FBG 发出反射光。磁场发生装置产

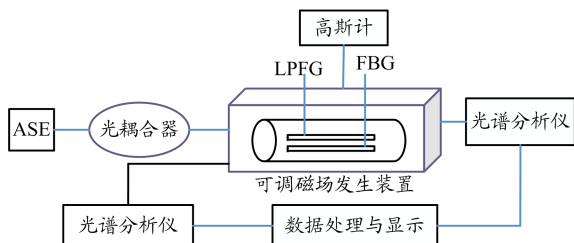


图 1 基于 MF 与双芯光纤的磁场传感系统示意图

生的磁场经高斯计测量,提供精确的场强值,采用 2 个光谱分析仪分别测量 LPFG 和 FBG 的谐振波长偏移量,2 个光谱仪发出的光分别经解调仪处理显示。

相比原来基于 MF 的光纤磁场传感系统,利用非同轴双芯光纤既保证了 LPFG 和 FBG 同时受温度和磁场作用,又避免了两者之间相互耦合对谐振波长产生影响。由于 LPFG 和 FBG 对折射率和温度的灵敏度不同,采用热膨胀系数高的聚四氟乙烯(PTFE)封装 FBG 作为温度增敏传感器对基于 MF 的 LPFG 磁场传感测量系统进行修正,实现温度补偿,同时提高磁场测量精确度,并完成磁场和温度的双参量测量传感。

2 系统仿真与分析

2.1 温度对 MF 折射率的影响

在研究温度和外磁场对 MF 折射率的影响时,我们用 Matlab 软件进行仿真,选择 MF 折射率区间为 1.45~1.47,温度以 10℃ 为步长从 20℃~100℃ 进行改变,外加场强以 100 Oe 为步长从 0~800 Oe 变化, $n_s=1.470$, $n_0=1.4612$,拟合参数 $\alpha=0.25$,得到磁场强度与折射率和温度的关系如图 2 所示。

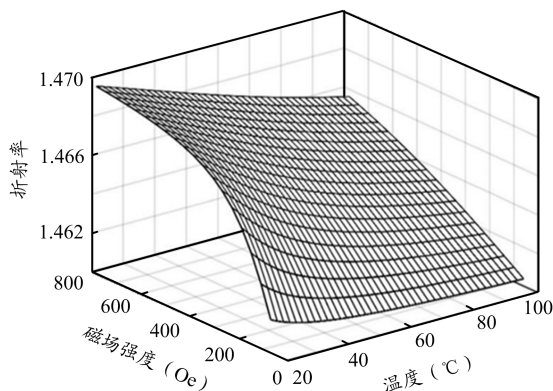


图 2 磁场强度与折射率和温度的关系

从图 2 可以看出,温度和外加磁场强度共同影响 MF 折射率。当磁场强度固定时,温度越高则 MF 折射率越低;在温度高于 60℃ 时, MF 折射率变化缓慢;当温度在 0℃~60℃ 内固定时,在 0~100 Oe 范围内 MF 的折射率随着磁场强度线性升高且速率较快;在 100~800 Oe 范围内,由于 n_s 趋于饱和, MF 折射率随外加场强增大,升高速度趋于平缓。在场强小于 100 Oe 时,温度与 MF 折射率关系为:

$$\Delta n_{ex} = 1.265 \times 10^{-3} \cdot \Delta T + 3.45 \times 10^{-3} \quad (3)$$

式(3)为温度变化量对 MF 折射率变化量 Δn_{ex} 的温度补偿公式。

2.2 温度对 LPFG 谐振波长的影响

由温度变化引起纤芯和包层的弹光效应将改变光纤的有效折射率^[7]。由相关文献可知,纤芯热光系数与包层热光系数差值决定 LPFG 波长移动方向,LPFG 选取不同包层热光系数时,谐振波长与外界温度之间的线性关系如图 3 所示。仿真选取参数如下:光纤热膨胀系数 $\alpha=0.55\times10^{-6}$,纤芯有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}=1.4610$,纤芯有效热光系数 $\xi_{\text{eff}}^{\text{co}}=6.7\times10^{-6}$;包层有效热光系数 $\xi_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别选取 6.3×10^{-6} 、 6.5×10^{-6} 、 6.7×10^{-6} 、 6.9×10^{-6} 和 7.1×10^{-6} 。

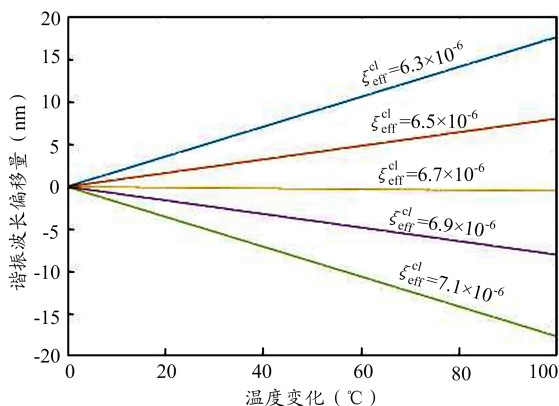


图 3 不同包层热光系数下 LPFG 谐振波长对温度的响应

由图 3 可知,选取同一偏移方向的纤芯和包层有效热光系数相差越大时^[8],LPFG 谐振波长向短波方向漂移越迅速,传感器温度灵敏度越高。因此,本文选取 $\xi_{\text{eff}}^{\text{co}}=6.7\times10^{-6}$, $\xi_{\text{eff}}^{\text{cl}}=7.1\times10^{-6}$,此时谐振波长的偏移量随温度变化,用函数关系式表示为:

$$\Delta\lambda_{\text{LPFG-T}} = -0.1161 \times 10^{-3} \cdot T(4)$$

式(4)作为温度对 LPFG 的温度补偿公式。

2.3 环境折射率对 LPFG 谐振波长影响

本文采用 $\lambda=1540\text{ nm}$ 的纤芯掺锗光纤,外部介质折射率从 0.8~1.7 变化,在 $r_{\text{co}}=4.13\text{ }\mu\text{m}$ 、 $r_{\text{cl}}=62.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $n_{\text{co}}=1.4610$ 和 $n_{\text{cl}}=1.4490$ 条件下对 LPFG 折射率特性进行仿真,结果如图 4 所示。当外部介质折射率从 0.80~1.424 逐渐增大时,LPFG 谐振波长向短波方向的偏移量 $\Delta\lambda$ 接近 32 nm;当外部介质折射率在 1.310~1.424 之间时,LPFG 谐振波长变化速率将出现极大值, $\Delta\lambda$ 接近 30 nm,此时 LPFG 对折射率灵敏度最强;当外部介质折射率大于 1.424 时,LPFG 的透射波长基本不随外界折射率发生变化。因此,本系统选用 MF 折射率的取值范围为 1.310~1.424。

2.4 FBG 的增敏封装

虽然纤芯掺锗的裸 FBG 温度灵敏度仅为

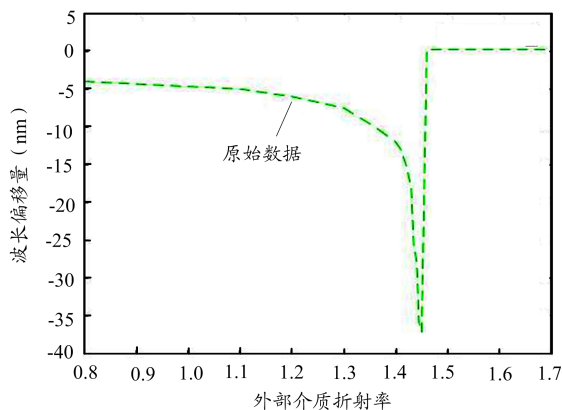


图 4 数值计算处的外部介质折射率与波长漂移曲线

7.19 pm/K,但是外界温度变化会导致 FBG 纤芯周期变化,因此可通过监测 FBG 纤芯波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 来测量环境温度^[9]。FBG 的温度灵敏度系数为^[10]:

$$K_{B,T} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \Delta T} = ((1-P_e)\alpha_{\text{coating}} + \zeta) \quad (5)$$

其中, α_{coating} 为涂覆材料热膨胀系数。从式(5)可知,将光纤用热敏材料封装,材料热膨胀带动 FBG 轴向拉伸^[11],引起光栅中心波长漂移。由于任何材料的热膨胀系数都会随着温度的降低而降低,故应选择热膨胀系数高且较为稳定的物质作为 FBG 的基底材料。PTFE 热膨胀系数较高,为 $10\times10^{-5}\sim12\times10^{-5}$,且对于反射波长为 1550 nm 的 FBG^[12],封装后可在 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用,该 PTFE 的热膨胀在 0~300 K 时是聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA 的 1.8 倍,是氧化铝的 5 倍。我们在不同温度下对裸 FBG、金属氧化铝封装 FBG、PMMA 涂覆 FBG 以及 PTFE 涂覆的 FBG 灵敏度进行统计,结果如图 5 所示。可以看出,PTFE 涂覆的 FBG 温度灵敏度更高,且适应温度范围也相应更大。

因此,我们用 PTFE 做基底材料进行增敏封装,当

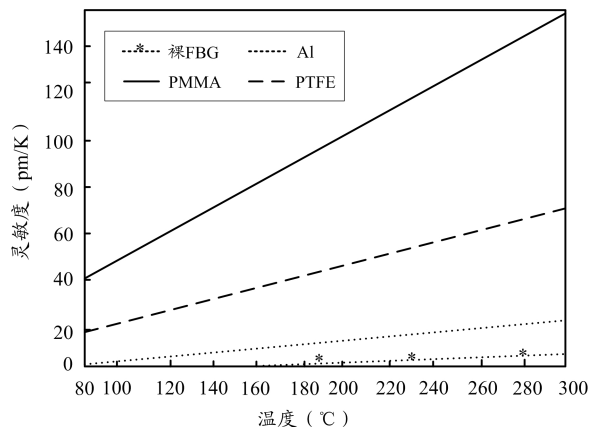


图 5 不同温度下氧化铝、PMMA 和 PTFE 做涂覆物质的温度灵敏度

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

温度变化范围不大时,光纤材料的热光系数 ξ 为常数, $\xi=6.67\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{\text{PTFE}}=12\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, $P_e=0.22$; 经式(5)计算可知,涂覆层厚度为 18.6 nm, $\lambda_B=1550$ nm 的 FBG, 在 300 K 下增敏封装温度灵敏度系数 $K_{B,T}=150$ pm/K, 为裸 FBG 的 20.8 倍。将 FBG 温度与波长漂移长度进行曲线拟合,结果如图 6 所示。

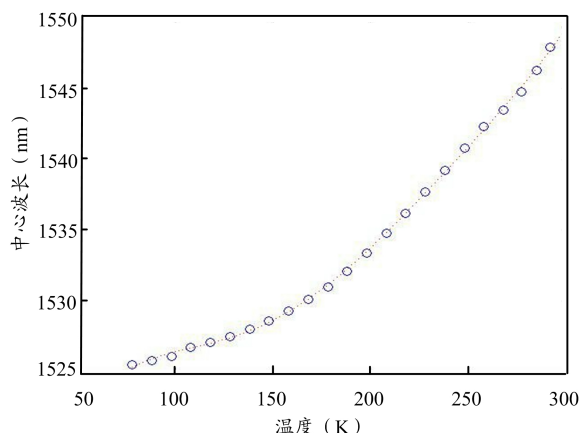


图 6 涂覆层厚度为 18.6 nm 的 FBG 对温度的响应

图 6 中的拟合曲线可表示为:

$$y=1.7855\times 10^{-10}\cdot x^5-1.774\times 10^{-7}\cdot x^4+6.7152\times 10^{-5}\cdot x^3-1.1604\times 10^{-2}\cdot x^2+0.9615\cdot x+1495.1 \quad (6)$$

从式(6)可知,FBG 受 PTFE 的热膨胀作用,引起 FBG 由应力作用反射和透射的光波产生漂移^[11],故此封装起温度增敏效果。

2.5 温度补偿结果分析

实验以 17 $^{\circ}\text{C}$ 为基准,实际温度分别增加了 3 $^{\circ}\text{C}$ 、6 $^{\circ}\text{C}$ 、9 $^{\circ}\text{C}$ 和 12 $^{\circ}\text{C}$, 通过光谱仪观测 FBG 的波长分别为 1546.9 nm、1547.7 nm、1548.8 nm 和 1549.3 nm, 根据式(6)可计算出对应的温度为 17.020 $^{\circ}\text{C}$ 、20.023 $^{\circ}\text{C}$ 、23.019 $^{\circ}\text{C}$ 和 26.021 $^{\circ}\text{C}$, 测量出的温度根据式(3)和式(4)对 MF 的折射率和 LPFG 耦合的谐振波长做相应补偿,通过 Matlab 进行仿真,结果如图 7 所示。

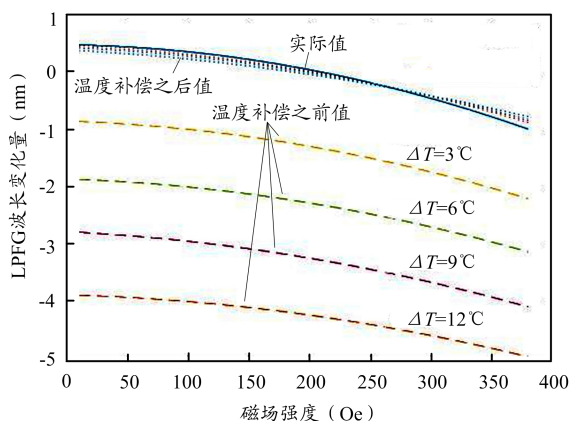


图 7 LPFG 谐振波长偏移量与磁场强度的关系

由 LPFG 谐振波长偏移量与磁场强度的仿真图可以看出,当温度逐渐升高时,未经温度补偿的曲线距离实际值变远,说明温度对系统的影响增大。经过 FBG 温度补偿之后,系统中传感器的测量精度有效提高。与未进行温度补偿的系统相比,相对误差减小量分别为 81.98%、81.89%、82.02%和 81.95%。

3 结束语

本文提出了一种具有温度补偿模块的磁场强度和温度双参量测量的实验方案。在非同轴双芯内集成周期不同的 LPFG 和 FBG,采用 FBG 表面涂覆热膨胀系数高的 PTFE 来进行温度增敏处理。通过光谱仪观测 FBG 的波长偏移量来测量温度,对 LPFG 谐振波长和 MF 折射率分别进行补偿。结果表明:本方案有效解决了磁场测量中温度交叉敏感的问题,与温度补偿之前的系统相比,相对误差减少至少 81%以上,有效提高了磁场测量精确度,且实现 800 Oe 范围内的磁场强度测量,故本研究对基于磁性物质的磁场测量具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] 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(9):24-27.
- [2] 李尧丞,王海潼,赵欣. 基于磁流体的 LPFG 磁场传感器的温度特性[J]. 光通信技术, 2015, 39(2):40-42.
- [3] 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.
- [4] 郭贞贞. 基于正交偏振双频光纤激光器的微弱磁场传感器研究[D]. 暨南大学, 2014.
- [5] HONG C Y, HRNG H E, YANG S Y. Tunable refraction index of magnetic fluids and its applications [J]. Physica Status Solidi (c), 2004, 1(7): 1604-1609.
- [6] 何如双,张斌,陶卫东,等. 小区域腐蚀的长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪传感特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8):52-56.
- [7] 罗彬彬,邹文根,赵明富,等. 极大倾斜角度光纤光栅 pH 值传感器及其增敏研究[J]. 光学学报, 2017, 37(1):113-120.
- [8] 陈美娟,李传起,罗德俊,等. 高灵敏度级联长周期光纤光栅温度与应变传感的理论研究[J]. 量子电子学报, 2015, 32(2):228-234.
- [9] 魏昊文,徐宁. 高灵敏度布喇格光纤光栅温度传感器 [J]. 光通信技术, 2019, 43(5):1-6
- [10] SENGUPT D, SHANKAR M S, REDDY P S, et al. An improved low temperature sensing using PMMA coated FBG [C]// Communications and Photonics Conference and Exhibition, November 13-16, 2011, Shanghai, China. Piscataway: IEEE, 2011.
- [11] 谢仁伟,张学智,王双,等. 光纤光栅温度传感器稳定影响因素研究[J]. 光电子·激光, 2018, 29(4):363-369.