

基于磁流体的光学电流传感器的温度特性研究

张浩¹,李永倩¹,苑宝义²,杨志¹,程方圆¹,苑泽²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;2. 河北荣毅通信有限公司 光电网研究院,河北 保定 071000)

摘要:针对磁流体电流传感器同时受磁场和温度影响的特点,研究了基于磁流体的光学电流传感器,并搭建了测试传感器温度特性的实验系统。结果表明:在 26 ℃~74 ℃ 范围内,由于磁流体热透镜效应引起的温度梯度和恒温水浴温度升高引起磁性纳米颗粒的布朗运动增强,所以随恒温水浴的温度升高,基于磁流体的光学电流传感器的透射率减小。

关键词:温度;磁流体;电流传感器;光透射特性;透射率

中图分类号:TN818 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)11-0001-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on temperature characteristics of optical current sensor based on magnetic fluid

ZHANG Hao¹, LI Yongqian¹, YUAN Baoyi², YANG Zhi¹, CHENG Fangyuan¹, YUAN Ze²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;

2. Hebei Rongyi Communication Co. Ltd., Optical Power Grid Research Institute, Baoding Hebei 071000, China)

Abstract: Aiming at the simultaneous influence of magnetic field and temperature on the magnetic fluid current sensor, optical current sensor based on magnetic fluid is studied and the experimental system of temperature characteristics of the sensor is built. The results show that in the range of 26 ℃~74 ℃, the thermal lens effect of magnetic fluid causes a temperature gradient, and the temperature of the constant temperature water bath increases the Brownian motion of the magnetic, therefore, the transmittance of the magnetic fluid optical current sensor decreases as the temperature of the constant temperature water bath increases.

Key words: temperature; magnetic fluid; current sensor; optical transmission properties; transmittance

0 引言

磁流体是一种磁性功能材料,由磁性纳米颗粒、载液和活性剂等组成,既具有液体的流动性又具有固体材料的磁性,吸引了学者的广泛关注。磁流体的光学特性主要包括磁致折射率可调、磁光效应和热透镜效应等。科研人员利用磁流体的光学特性研究了多种类型的传感器,用于折射率^[1]、磁场^[2-6]、温度^[7-8]、应变^[9]和生物 DNA^[10]等物理量的测量。

收稿日期:2019-07-30。

基金项目:国家自然科学基金(61775057、61377088)资助;河北省科技计划项目-重点项目(15212103D)资助。

作者简介:张浩(1988-),男,博士研究生,主要从事光传感、光电网和能源互联网等领域的研究。作为负责人或主研人完成河北省科技计划项目(重点)、国家自然科学基金以及福建省电力公司重大科技等纵向和横向项目。



在电力系统的电流测量应用中,光学电流传感器同时受磁场和温度的作用,由于磁流体对磁场和温度均是敏感的,所以需要研究磁流体电流传感器的温度特性。在磁流体的温度特性研究方面,YUSUF S Y 等人^[11]研究了温度对磁流体的透射率和磁性纳米颗粒的法拉第旋转的影响,二者均在 $T < 225$ K 范围内随温度的升高而增大,而在 $T > 255$ K 范围内随温度的升高而减小。YANG S Y 等人^[12]研究了温度对垂直磁场下磁流体薄膜的结构形成的影响,结果表明:需要较强的磁场使磁性纳米颗粒在较高的温度下聚集;当温度升高时,需要更强的磁场以使磁性颗粒有序排列。李尧丞等人^[13]在理论研究及数值模拟方面,对长周期光纤光栅的磁流体磁场传感方案的温度特性进行了研究。此外,科研人员在对磁流体温度特性研究的基础上进行了传感器的温度补偿研究^[14-17],或者如何实现温度及磁场的同时测量^[18]。

本文针对磁流体电流传感器同时受磁场和温度影响的特点,研究仅受温度而不受磁场影响情况下的光学电流传感器的温度特性。

1 基本原理

本文中的光学电流传感器主要是基于磁流体的光透射特性设计及制作的。当未施加磁场时,磁流体中的磁性纳米颗粒做随机运动;当施加磁场后,磁性纳米颗粒首先随磁场方向聚集,然后排列成短链,随后短链逐渐变长、变粗形成粗长链^[9]。磁流体的热透镜效应是当光入射到磁流体中,磁性纳米颗粒吸收光的能量,导致磁流体的温度上升,从而形成温度梯度和浓度梯度,引起光的扩散。

2 基于磁流体的光学电流传感器及其温度特性实验系统

基于磁流体的光学电流传感器结构如图1所示。将毛细管填充满磁流体,2根端面经过精密切割的光纤分别从毛细管的两端插入,2个光纤端面之间的距离即是传感器的薄膜厚度,实验中制作的传感器薄膜厚度为200 μm和400 μm。入射光沿上述2根光纤中的其中一根入射到磁流体,经磁流体后从另一根光纤中透射。入射光方向垂直于传感器薄膜的表面^[20]。

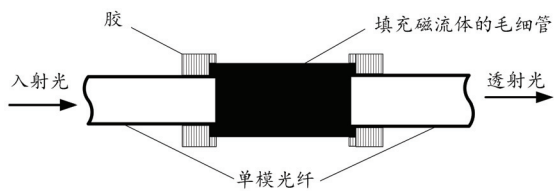


图1 基于磁流体的光学电流传感器结构

基于磁流体的光学电流传感器的温度特性实验系统如图2所示。系统由宽带光源、光可调衰减器、磁流体传感器、恒温水浴、光功率计和单模光纤等组成。宽带光源发出的光经可调衰减器后进入光学电流传感器,光学电流传感器位于恒温水浴中,使用光功率计测量从光学电流传感器中透射的光功率。其中,宽带光源的波长范围是1527~1568 nm,输出光功率是

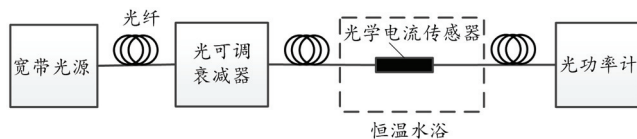


图2 光学电流传感器的温度特性实验系统

34 mW;传感器中的磁流体是红棕色粘稠液体,使用合成酯油载液,Fe₃O₄磁性纳米颗粒的平均直径是10 nm,饱和磁化强度是110 Gs;恒温水浴的箱体采用塑料材质以免影响磁流体中的磁性纳米颗粒的排列,水浴的温度范围是10℃~90℃;光功率计的测量功率范围是-70~+10 dBm,波长范围是800~1650 nm。

3 实验结果与讨论

实验主要是测量在未施加磁场的情况下,基于磁流体的光学电流传感器的透射率随恒温水浴温度的变化情况。定义光学电流传感器的透射率为:

$$R = \frac{P_t}{P_0} \quad (1)$$

其中, R 是传感器的透射率, P_t 是当传感器置于 t ℃的恒温水浴时的透射光功率, P_0 是传感器的入射光功率。

薄膜厚度为200 μm和400 μm的光学电流传感器的透射率随恒温水浴温度的变化情况分别如图3、图4所示。图中各点是实测值,曲线是对实测值进行拟合的结果。

首先,从磁流体的光透射特性方面分析,2个传感器的薄膜厚度分别是200 μm和400 μm,光的透射距离增加了一倍。光在磁流体中的透射是一个复杂的过程,包括光的吸收、散射和折射等。磁流体的光透射特

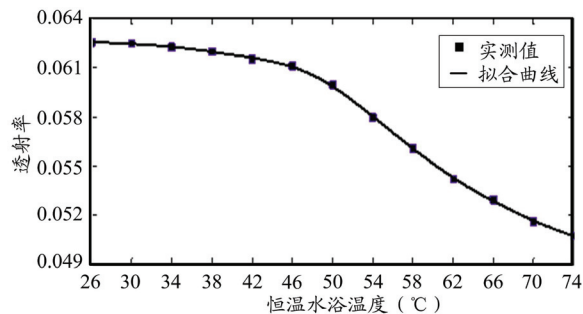


图3 厚度为200 μm光学电流传感器的透射率随温度的变化情况

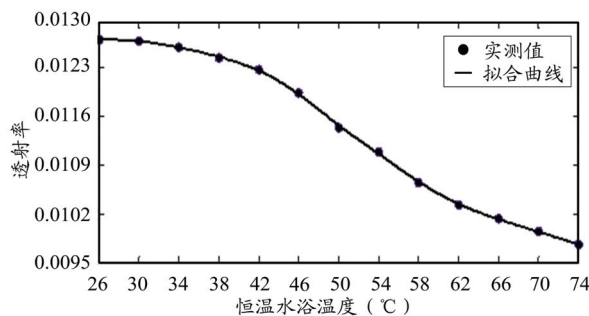


图4 厚度为400 μm光学电流传感器的透射率随温度的变化情况

性近似符合 Beer-Lambert 定律,即透射率随距离的增加而呈指数下降^[6]:

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp\left(-\int_0^L \beta dl\right) \quad (2)$$

其中, T 是磁流体薄膜的透射率, L 是薄膜厚度, I_0 和 I 分别是光从磁流体进入和透射的光功率, β 是衰减系数。透射率随距离增加呈指数衰减,2个传感器的透射率相差数十倍主要是由于光在磁流体中的吸收、散射和折射等造成的。

然后,从磁流体的温度特性方面分析:由数据和曲线的总体趋势可以看出,2个传感器的透射率随恒温水浴温度的变化情况是相似的,当恒温水浴的温度在 26℃~74℃范围内以 4℃为步进升高的过程中,传感器的透射率均随温度的升高而减小。具体而言,透射率随温度的变化情况主要分为 2 个过程:当厚度为 200 μm 和 400 μm 的传感器在 26℃~46℃的较低温度范围内,2个传感器的透射率均随温度的升高而小幅减小;当厚度为 200 μm 和 400 μm 的传感器在 46℃~74℃的较高温度范围内,透射率随温度升高而急剧减小且与温度呈近似线性关系,随后减小的幅度逐渐变小,变化的原因主要是温度对磁流体的影响,由磁流体热透镜效应引起的温度梯度和恒温水浴温度升高引起磁性纳米颗粒的布朗运动增强共同决定的。

①对于 26℃~46℃较低温度范围内的情况:在未施加磁场且未将传感器置于恒温水浴中时,磁流体中的磁性纳米颗粒在载液中做布朗运动。

一方面,当光入射到磁流体中,由于热透镜效应,磁流体吸收部分光的能量,导致磁流体内部形成温度和浓度梯度。其中,光的发射角表示为^[21]:

$$\theta(r) = \frac{0.12P}{\pi k n_0} \left| \frac{dn}{dT} \right| \times \left[1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega}\right) \right] \cdot \frac{[1 - \exp(-\beta L)]}{r} \quad (3)$$

其中, r 、 P 和 ω 分别是光的横向半径、入射光功率和磁流体位置处的光斑半径; L 、 n_0 、 k 、 β 和 $|dn/dT|$ 分别为磁流体的薄膜厚度、折射率、热传导率、衰减系数和热光系数。由基尔霍夫理论得到透射光强度为^[21]:

$$I(R, Z) = \left(\frac{k_0}{Z}\right) I_0 \times \left[\int_0^\infty \left\{ r J_0\left(\frac{k_0 R r}{Z}\right) \times \exp\left(\frac{2r^2}{\omega}\right) \exp[-i(\varphi_L + \varphi_{NL})] \right\} dr \right]^2 \quad (4)$$

其中, R 和 Z 分别是光从磁流体透射后远场的光斑半径以及磁流体与光阑之间的距离; k_0 和 I_0 分别是入射光的传播常数和光强; J_0 是零阶第一类 Bessel 函数; φ_L 与 φ_{NL} 分别是强度相关及强度非相关的相位。所以,由于光入射到磁流体引起的热透镜效应导致磁流体形成温度梯度,磁性纳米颗粒吸收能量后沿半径方向逐渐向外移动引起浓度梯度,使得光通过磁流体时的发射角沿半径方向逐渐增大,透射光发散逐渐远离光的主轴方向,光从磁流体透射之后引起光的扩散,从而导致透射率减小。

另一方面,随温度从 26℃升高到 46℃左右的较低温度范围内,由于恒温水浴温度的升高导致磁流体的温度升高,使得磁性纳米颗粒的动能增加,颗粒的布朗运动强度增大。由布朗动力学方法可知,每个磁性纳米颗粒所受力主要包括基液对颗粒的粘滞摩擦力 F_t 、基液热扩散对颗粒的布朗力 F_b 和颗粒间的磁偶极子相互作用力^[22]。在未施加磁场的情况下, F_t 随温度升高而降低。载液的温度随恒温水浴的温度升高而升高,纳米颗粒与载液间进行能量交换, F_b 增大,所以温度上升引起颗粒的布朗运动增强导致透射率减小。

②对于 46℃~74℃较高温度范围内的情况:当温度逐渐升高在 46℃~62℃范围内时,一方面是磁流体的热透镜效应逐渐增强使磁流体形成温度梯度,导致光的扩散增强;另一方面,磁性纳米颗粒做布朗运动的本质是热运动,温度是影响布朗运动的直接因素,磁性纳米颗粒随温度升高而受到的 F_b 增强,动能逐渐增大导致剧烈的布朗运动。因此,磁流体的透射率急剧减小且与温度近似呈线性关系。而当温度处于 60℃~70℃的温度范围内时,一方面是磁流体的热透镜效应趋于饱和,不再引起更强的温度梯度;另一方面,随恒温水浴的温度升高,磁性纳米颗粒受 F_b 做剧烈的布朗运动,增加了基液对颗粒的 F_t ,导致磁性纳米颗粒的布朗运动较为剧烈但有所减弱,所以透射率仍然减小,但减小的幅度降低。

4 结束语

基于磁流体的光学电流传感器同时受磁场和温度影响,所以在利用传感器进行电流测量时需考虑温度的影响。本文的研究表明:当光学电流传感器仅受温度影响而无外加磁场时,透射率随温度的升高而降低,尤其是在较高温度范围内。光学电流传感器温度特性的研究为消除温度影响或实现电流及温度的同

时测量奠定了基础。在研究传感器温度特性的基础上,需进一步研究在施加磁场后传感器的光透射特性随磁场和温度的变化情况,这对电流传感器的应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] ZHENG Y Z, CHEN L H, YANG J Y, et al. Fiber optic Fabry-Perot optofluidic sensor with a focused ion beam ablated microslot for fast refractive index and magnetic field measurement [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 5601905-1-5601905-6.
- [2] LUO L F, PU S L, TANG J L, et al. Highly sensitive magnetic field sensor based on microfiber coupler with magnetic fluid [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(19): 193507-1-193507-5.
- [3] YUE C X, DING H, LIU X F. Magnetic-field measurement based on multicore fiber taper and magnetic fluid [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(3): 688-692.
- [4] LAYEGHI A, LATIFI H, FRAZAO O. Magnetic field sensor based on nonadiabatic tapered optical fiber with magnetic fluid [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1904-1907.
- [5] 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): 5300307-1-5300307-7.
- [6] LI Y Q, ZHANG H, YANG Z, et al. Incident-power-dependent optical transmission properties of magnetic fluid films [J]. Optik, 2018, 172: 730-735.
- [7] 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.
- [8] PATHAK S, JAIN K, NOORJAHAN, et al. Magnetic fluid based high precision temperature sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(9): 2670-2675.
- [9] CANDIANI A, KONSTANTAKI M, PAMVOUXOGLU A, et al. A shear sensing pad, based on ferrofluidic actuation in a microstructured optical fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 5600307-1-5600307-7.
- [10] BAROZZI M, MANICARDI A, VANNUCCI A, et al. Optical fiber sensors for label-free DNA detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3461-3472.
- [11] YUSUF N A, SAFIAL H A, ABU-ALJARAYESH I, et al. Temperature dependence of the faraday rotation and the transmission of light in magnetic fluids [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1990, 85(1-3): 85-88.
- [12] YANG S Y, CHEN Y F, KE Y H, et al. Effect of temperature on the structure formation in the magnetic fluid film subjected to perpendicular magnetic fields [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 290-292.
- [13] 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): 44-46.
- [14] JIA Z X, PU S L, RAO J, et al. Temperature self-compensative all-fiber magnetic field sensing structure based on no-core fiber cascaded with fiber Bragg gratings [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 119: 26-29.
- [15] LIU Z J, YU Y S, ZHANG X Y, et al. Optical microfiber taper magnetic field sensor with temperature compensation [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4853-4856.
- [16] LI X L, DING H. Temperature insensitive magnetic field sensor based on ferrofluid clad microfiber resonator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(24): 2426-2429.
- [17] LIU H, WANG H R, CHEN C C, et al. Highly sensitive and temperature-compensated fiber bending sensing based on directional resonance coupling in photonic crystal fibers [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47: 164-171.
- [18] CHEN Y F, HAN Q, YAN W C, et al. Magnetic-fluid-coated photonic crystal fiber and FBG for magnetic field and temperature sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(23): 2665-2668.
- [19] 陶丹,杨志,张浩,等. 基于双光路的磁流体光透射特性研究 [J]. 光通信技术, 2015, 39(9): 60-62.
- [20] 李永倩,张浩,杨志,等. 基于光透射特性的光学研究 [J]. 光通信技术, 2017, 41(11): 5-7.
- [21] 王昊天,卜胜利,王宁. 基于磁流体热透镜效应的阈值可调光学限幅器的理论设计 [J]. 光子学报, 2012, 41(9): 1009-1014.
- [22] 刘璟璐. 基于布朗动力学的磁流体热透镜效应的理论研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.

《中文核心期刊要目总览》2017 年版入编通知(节选)

《光通信技术》主编:

我们谨此郑重通知:依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、统计和分析,以及学科专家评审,贵刊《光通信技术》入编《中文核心期刊要目总览》2017 年版(即第 8 版)之“无线电电子学、电信技术”类的核心期刊。该书由北京大学出版社出版。书中按《中国图书馆分类法》的学科体系,列出了 78 个学科的核心期刊表,并逐一对核心期刊进行了著录。著录项目包括:题名、并列题名、主办单位、创刊时间、出版周期、学科分类号、ISSN 号、CN 号、邮发代码、编辑部地址、邮政编码、电话、网址、电子邮箱、内容简介等。

《中文核心期刊要目总览》2017 年版编委会