

# 磁流体的折射率可调谐特性分析

吴迪<sup>1,2</sup>, 赵勇<sup>1,2</sup>, 吕日清<sup>1,2</sup>, 英宇<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 从理论上分析出温度和磁场是影响磁流体折射率的两大因素, 并根据菲涅尔反射原理设计具有独立传感探头的磁流体折射率特性测量方案, 实验得出温度和磁场对磁流体折射率的影响特性. 结果表明: 对于浓度一定的磁流体, 在零磁场作用下, 折射率随着温度的升高线性下降, 灵敏度为  $-8.02 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; 温度恒定时, 在外加平行磁场作用下, 磁流体的折射率随着磁场强度的增大而增大, 且结果具有良好的一致性. 得到的磁流体的可调谐折射率特性为磁流体填充到光子晶体光纤(光栅)中实现磁场和温度传感提供了理论基础.

**关键词:** 磁流体; 折射率; 菲涅尔反射; 可调谐特性; 温度和磁场传感

中图分类号: TB 34 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2014)07-0931-04

## Analysis of Tunable Refractive Index Characteristics of the Magnetic Fluid

WU Di<sup>1,2</sup>, ZHAO Yong<sup>1,2</sup>, LYU Ri-qing<sup>1,2</sup>, YING Yu<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Yong, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** Temperature and magnetic field are the two factors which will affect the magnetic fluid refractive index through theoretical analysis. A method with independent sensing probes based on the principle of Fresnel reflection was presented. Experimental measurements were carried out to investigate the relation between the magnetic field intensity and temperature dependent refractive index of the magnetic fluid. The results showed that, for a given concentration of the magnetic fluid, the effect of temperature on  $n_{\text{MF}}$  was relatively insignificant with a sensitivity of  $-8.02 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  under zero magnetic field intensity. When there was an external magnetic field (parallel to the propagation direction of light), the  $n_{\text{MF}}$  would increase with the increase of the magnetic field intensity at constant temperature. The repeatable performance of this device was also proved to be perfect. The tunable refractive index characteristics of magnetic fluid could be used as the theoretical basement for filling into the photonic crystal fiber (grating) to achieve a magnetic field and temperature sensing.

**Key words:** magnetic fluid; refractive index; Fresnel reflection; tunable characteristics; temperature and magnetic field sensing

磁流体(magnetic fluid, MF)是磁性微粒借助表面活性剂均匀地弥散在基液中而形成的稳定胶体体系, 它兼具固体的磁性和液体的流动性. 作为一种新的功能性材料, 磁流体有很多独特的光学性质, 如可调谐折射率特性、双折射效应、热透镜效应等. 其中, 可调谐折射率特性的应用最为广

泛, 利用该特性制作的光学器件和实现的传感方案越来越多<sup>[1-4]</sup>, 因此研究磁流体的可调谐折射率特性有助于推动磁流体在光学传感领域的进一步应用.

虽然, 磁流体在1965年<sup>[5]</sup>就已经被制备出来了, 但是对于其折射率测量方面的研究相对较少.

直到 2002 年, Yang 等<sup>[6]</sup>采用全反射的方法测得了磁流体的折射率. 该方法不仅需要—个折射率比磁流体还要高的棱镜, 还需要很精确的光路调节去形成全反射回路, 在实验中难以保证很高的精度和重复性. 2005 年, Pu 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于光纤端面后向反射的方法来测量磁流体折射率的方法, 将光纤插入盛有大量磁流体的烧杯中, 该方法和全反射方法相比, 结构相对简单且没有复杂的光路调节问题, 但是容易造成磁流体的挥发和污染. 在此基础上, 本文提出了一种具有独立传感探头的磁流体折射率特性测量方案, 并且在信号处理上采用差分电路<sup>[8]</sup>, 能有效消除光路中固有损耗的影响, 使结果更为准确.

## 1 理论分析

对于具有超顺磁性的磁流体来说, 其折射率可由朗之万函数<sup>[9]</sup>描述如下:

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

其中: 当磁感应强度达到临界磁场  $H_{c,n}$  时, 磁流体折射率  $n_{MF}$  才开始发生变化;  $n_0$  是外界磁场小于  $H_{c,n}$  时磁流体的折射率;  $n_s$  是磁流体的饱和折射率;  $H$  是外加磁感应强度,  $T$ ;  $T$  是外界温度, K. 从式(1)中可以看出, 对于给定浓度的磁流体, 温度和磁场是影响磁流体折射率的两大因素.

## 2 测量方案设计

基于菲涅尔反射原理和差分的思想, 本文设计的磁流体折射率测量实验装置原理图如图 1 所示, 波长为 1 550 nm 的光从稳定的激光光源发出, 经过 3 dB 耦合器后平均分成两路, 经过环形器和两路传感探头之后, 被各自的光功率计接收, 最后由计算机做后期的信号处理.

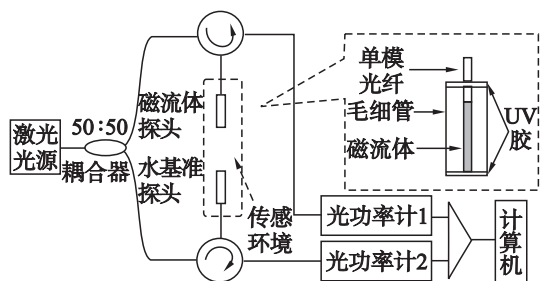


图 1 磁流体折射率测量实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for measuring the refractive index of MF

磁流体探头的具体设计如图 1 中虚线框所示, 借助六维调整架将单模光纤插进装有磁流体样品的毛细管中, 毛细管两端用 UV 胶密封. 独立的密封探头设计能有效避免之前文献中磁流体的挥发和污染问题, 在实验中使用更为方便, 光路更稳定. 将之前方法中的毛细管中装水, 水基准探头同理可制得. 磁流体探头和水基准探头要放在同一传感环境中以保持各条件一致. 差分的思想是为了消除光路中一些固有的损耗.

根据菲涅尔反射原理, 当一束光入射到两种不同介质的分界面上, 由于折射率的差异, 一部分光会反射回来. 两路反射回来的光强  $I_1$  和  $I_2$  可表示如下<sup>[10]</sup>:

$$I_1 = K_1 I_0 \frac{(n_{fc} - n_{MF})^2 + k_{MF}^2}{(n_{fc} + n_{MF})^2 + k_{MF}^2}, \quad (2)$$

$$I_2 = K_2 I_0 \frac{(n_{fc} - n_{water})^2}{(n_{fc} + n_{water})^2}. \quad (3)$$

其中:  $I_0$  是光源的输出光强; 光纤的折射率  $n_{fc} = 1.467$ ; 水的折射率  $n_{water} = 1.333$ ;  $k_{MF}$  是磁流体的衰减系数, 由实验测得  $k_{MF} = 5.345 \times 10^{-3}$ ;  $K_1$  和  $K_2$  分别是两路光强的衰减系数. 通过式(2)和式(3)能得出相对反射强度  $R$  的表达式:

$$R = I_1/I_2 = \frac{K_1}{K_2} \frac{(n_{fc} - n_{MF})^2 + k_{MF}^2}{(n_{fc} + n_{MF})^2 + k_{MF}^2} \cdot \frac{(n_{fc} + n_{water})^2}{(n_{fc} - n_{water})^2}. \quad (4)$$

实验之前, 两个支路先用两个水基准传感探头来调平电路, 通过调节差分电路的滑动变阻器使两路采集到的功率相等, 此时有  $K_1 = K_2$ . 因此, 式(4)可被化简得到磁流体折射率的表达式:

$$n_{MF} = n_{fc} \cdot \left( \frac{1 + \eta}{1 - \eta} \right) \pm \sqrt{\frac{4\eta}{(1 - \eta)^2} \cdot n_{fc}^2 - k_{MF}^2}. \quad (5)$$

其中,  $\eta = \frac{(n_{fc} - n_{water})^2}{(n_{fc} + n_{water})^2} \cdot R$ , 实验中使用的磁流体样品为水基的  $Fe_3O_4$  磁流体 (EMG507, Ferrotec), 单位粒子体积分数为 1.8%. 因为磁流体折射率小于光纤的折射率, 因此式(5)中应该取负号. 这样, 通过改变外界传感环境, 从光功率计采集到的信号就可以计算得到磁流体的折射率.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 温度对磁流体折射率的影响

在研究温度对磁流体折射率的影响时, 将磁流体探头和水基准探头同时放在温控箱中, 在没有磁场作用的情况下, 控制温度范围为  $0 \sim 70^\circ C$ . 得到的磁流体折射率和温度的关系如图 2 所示.

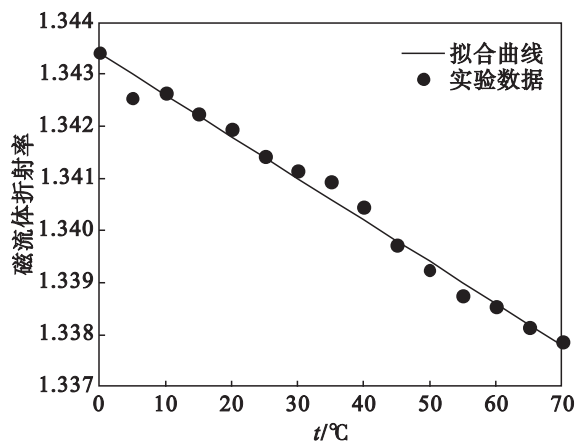


图 2 温度对磁流体折射率的影响  
Fig. 2 Relationship between the refractive index and the temperature

从图 2 可以看到,磁流体的折射率随着温度的升高线性降低. 灵敏度为  $-8.02 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 温度对磁流体折射率的影响很微弱. 得到了磁流体折射率的温度依赖特性之后,可以将其用于制作基于磁流体的温度传感器,考虑到温度的影响很微弱,可以将该特性用于温度补偿算法.

3.2 磁场对磁流体折射率的影响

由 3.1 节可知,温度对磁流体的折射率会有一定的影响,因此在研究外加磁场对磁流体折射率的影响时,应该保持温度恒定. 为了营造一个磁场稳定且温度恒定的环境,课题组自行设计了一套恒温液冷线圈,如图 3 所示. 700 匝铜线均匀缠绕在铝制外壳上,通过调节该线圈内部电流实现磁场的改变. 壳体内通有冷却液,通过外部的散热循环装置来保持线圈周围温度恒定,这一设计能有效防止线圈内电流过大时由于线圈温度上升造成磁流体探头附近温度的改变.

众所周知,当有外加磁场作用于磁流体时,磁流体中的微粒会沿着磁场的方向形成磁链,这便是磁场作用下其折射率改变的根本原因. 本文以磁场方向平行于光路传播方向的情况为例去分析磁感应强度对其折射率特性的影响,因为此时磁流体的粒子呈现各向同性. 将磁流体传感探头置于恒温液冷线圈中间,外部通过高斯计实测磁感应强度. 通过可编程电源来调节线圈中电流的大小,进而控制产生  $0 \sim 0.065 \text{ T}$  的磁场(每 30 min 改变  $5 \times 10^{-3} \text{ T}$ ). 实验过程中实测磁流体传感探头的温度为  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

实验中,为了验证磁控折射率特性的重复性,分别测试了当磁场从 0 T 升高到 0.065 T 和磁场从 0.065 T 降低到 0 T 时磁流体的折射率特性曲线,实验结果如图 4 所示,实线和虚线分别

代表磁场的升程和降程过程中的磁控折射率曲线.

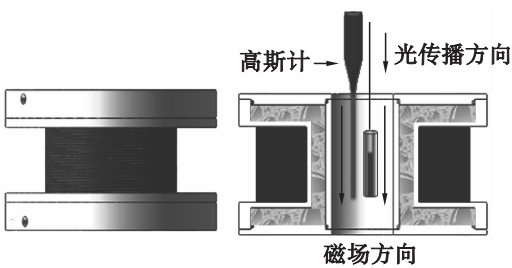


图 3 恒温液冷线圈及平行磁场施加方案  
Fig. 3 Constant temperature water-cooling coils and the placement of the probe in parallel magnetic field

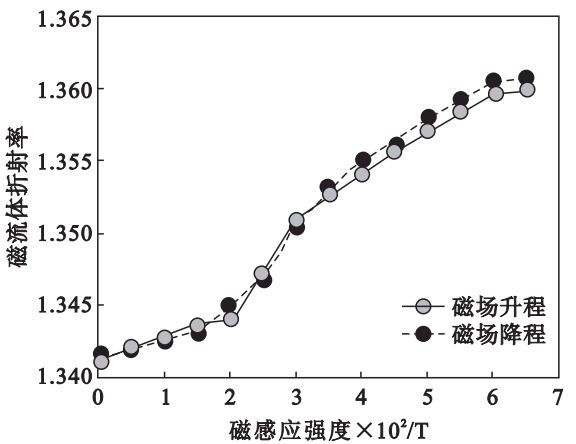


图 4 平行磁场对磁流体折射率的影响  
Fig. 4 Relationship between the refractive index and the parallel magnetic field

当外加磁场作用于磁流体时,磁流体会发生磁电效应,磁流体的电极化率  $\chi$  将会发生改变,根据文献[11]可知:

$$n_{\text{MF}} = \sqrt{1 + \chi}.$$

(6)

因此,当磁场作用于磁流体时,其折射率会发生改变. 从图 4 可以看出,当外加磁场方向平行于光路传播方向时,磁流体的折射率随着磁场强度的升高而升高,即  $n_{\text{MF}}$  与磁场强度成正比. 与文献[12]的结论(当外加磁场方向和光传播方向平行时,有  $\frac{\partial \chi}{\partial H} > 0$ )相符合.

观察图 4 中的曲线趋势,当磁感应强度从 0 T 逐渐增大到 0.02 T 时,磁流体的折射率上升比较缓慢,之后上升加快,但是到了 0.06 T 之后磁流体的折射率逐渐达到一种饱和状态,不再随着磁感应强度的增强而升高,这与文献[13]中描述的曲线趋势相符. 实线和虚线几乎重合,证明该测量方案的重复性较好.

4 结 论

1) 对于给定浓度的磁流体,温度和磁场是影响其折射率特性的两大因素.

2) 在零磁场作用下,磁流体的折射率随着温度的升高而线性降低.

3) 温度恒定条件下,当磁流体受到的外磁场作用方向与光传播方向平行时,磁流体的折射率随着磁场的增强先稳步上升,然后上升较快,最后趋于平缓;且实验结果的重复性较好.

参考文献:

[ 1 ] Zhao Y,Zhang Y Y,Lyu R Q, *et al.* Novel optical devices based on the tunable refractive index of magnetic fluid and their characteristics[ J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*,2011,323(23):2987 – 2996.

[ 2 ] Zu P,Chan C C,Lew W S, *et al.* Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber [ J]. *IEEE Photonics Journal*,2012,4(2):491 – 498.

[ 3 ] Zhao Y,Zhang Y Y,Wu D, *et al.* Magnetic field and temperature measurements with a magnetic fluid filled photonic crystal fiber Bragg grating [ J]. *Instrumentation Science & Technology*,2013,41(5):463 – 472.

[ 4 ] Zu P,Chan C C,Lew W S, *et al.* Magneto-optic fiber Sagnac modulator based on magnetic fluids[ J]. *Optics Letters*,2011,36(8):1425 – 1427.

[ 5 ] Papell S S. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles;US,3215572[ P]. 1965 – 11 – 02.

[ 6 ] Yang S Y,Chen Y F,Hong H E, *et al.* Magnetically-modulated refractive index of magnetic fluid films [ J]. *Applied Physics Letters*,2002,81(26):4931 – 4933.

[ 7 ] Pu S L,Chen X F,Chen Y P, *et al.* Measurement of the refractive index of a magnetic fluid by the retroreflection on the fiber-optic end face[ J]. *Applied Physics Letters*,2005,86(17):171904 – 1 – 171904 – 3.

[ 8 ] Chen L X,Huang X G,Zhu J H, *et al.* Fiber magnetic-field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and Fresnel reflection[ J]. *Optics Letters*,2011,36(15):2761 – 2763.

[ 9 ] Hong C Y,Hong H E,Yang S Y. Tunable refractive index of magnetic fluids and its applications [ J]. *Physica Status Solidi(c)*,2004,1(7):1604 – 1609.

[ 10 ] Su H,Huang X G. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions[ J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*,2007,126(2):579 – 582.

[ 11 ] Liu T,Chen X F,Di Z Y, *et al.* Measurement of the magnetic field-dependent refractive index of magnetic fluids in bulk [ J]. *Chinese Optics Letters*,2008,6(3):195 – 197.

[ 12 ] Dai J X,Yang M H,Li X B, *et al.* Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber Bragg grating[ J]. *Optical Fiber Technology*,2011,17(3):210 – 213.

[ 13 ] 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.

(Zhao Yong,Dong Jun-liang,Chen Jing-jing, *et al.* Optical properties of the magnetic fluid and its application in optical information technology and sensor [ J]. *Opto-Electronic Engineering*,2009,36(7):126 – 131. )