

文章编号:1004-4213(2010)10-1742-5

# 环境温度对纳米磁流体场诱导光学双折射的影响\*

卜胜利,刘明,孙国庆

(上海理工大学 理学院,上海 200093)

**摘要:**在 20~80 °C 温度范围内,研究了两种浓度的铁氧体(主要成分为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )磁流体在一系列固定磁场强度(场强范围为 0~200 mT)下的双折射与温度的关系.结果表明不同浓度磁流体的双折射具有类似的磁场和温度依赖性.固定磁场强度时,磁流体的双折射值与温度成反比;而温度恒定时,磁流体的双折射值与外磁场的强度成正比;在相同磁场强度、恒定温度下,高浓度磁流体的双折射值比低浓度磁流体的大.详细分析了实验结果,并深入讨论了磁流体双折射的温度、场强和浓度依赖性的物理机理.

**关键词:**磁流体;双折射;温度;浓度;磁场强度

**中图分类号:**O436

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103910.1742

## 0 引言

磁流体是一种由纳米级的强磁性颗粒通过表面活性剂高度均匀分散于某中载液中所形成的稳定胶体体系,它是由纳米磁性颗粒,表面活性剂和载液共同组成,其分散稳定性主要是由于表面活性剂和布朗运动的共同作用抵消磁性颗粒自身重力引起的沉降以及削弱粒子间电、磁的相互吸引引起的聚积,从而不产生沉淀和凝聚<sup>[1]</sup>.磁流体兼有磁性和液体的双重性质,通常显示超顺磁性,在外磁场作用下能够磁化,撤去外场后,其磁矩又重新恢复杂乱无章的无序状态而消失其磁特性.磁流体具有许多优异的场诱导光学和磁光性质<sup>[2-6]</sup>,其中研究比较多的是它的光学各向异性.在外磁场的作用下,磁流体内部磁性颗粒会在一定程度上沿着外磁场的方向排列,这将使得原来各向同性的磁流体变成各向异性的结构,使得磁流体会具有类似单轴晶体的双折射效应以及二向色性.

Llewellyn 于 1983 年研究了磁流体在 300-700 nm 波长范围内的双折射和二向色性的磁场依赖特性<sup>[7]</sup>,并利用 Wiener 理论对其实验结果进行了解释.之后,Taketomi 和 Chantrell 等人分别基于磁性颗粒聚集成链状结构<sup>[8]</sup>和粒子对模型<sup>[9]</sup>,建立了磁致双折射的理论计算公式.由于磁流体的磁致双折射等光学性质的强弱取决于磁场的大小和方向、磁流体的类型及性能参量等诸多因素,故可利用磁场

等外界环境来调节磁流体的光学性质的强弱(如双折射的大小),即磁流体的光学性质具有可调谐特性,这种可调谐特性可用来制作诸多优异的光学器件,在光学上具有潜在的应用价值.正因为如此,近年来,磁流体的光学和磁光性质的研究受到了相关领域学者的广泛重视<sup>[10-17]</sup>并提出了一些原理性的磁流体光学器件,如:利用磁流体的磁致双折射效应可以制作可调谐双折射滤波器、光学衰减器、光开关等器件<sup>[18-20]</sup>.

另外,磁流体的吸收系数相对较大,磁流体光学器件在工作时,器件的温度会有所升高,这将会加剧磁性颗粒的布朗运动,削弱磁性颗粒间的磁相互吸引,对场诱导的结构各向异性具有重要的影响,进而会影响磁流体的双折射,这与温度对普通固体双折射材料的影响具有本质性的区别.故系统全面地掌握磁流体双折射的温度依赖性显得相当重要,能够为磁流体器件性能的提高和工作稳定性的改善提供有益的参考,而目前文献对磁流体双折射的温度特性研究尚不系统,本文拟对不同浓度的常用磁流体(表面包覆型油基铁氧体磁流体),在常用磁场强度范围内(0~200 mT)研究环境温度(文中以 20~80 °C 范围的温度为例)对磁流体场诱导光学双折射效应的影响,并对其物理机理进行了详细的分析.

## 1 实验装置与实验方法

为了实验研究环境温度对磁流体的场诱导光学双折射的影响,我们自行设计了一套实验装置,如图 1.入射激光为氦氖激光器产生的线偏振光,其输出波长为 632.8 nm.实验中,为了获得最大的灵敏度,利用半波片使激光器出射的平面线偏振光的偏振方

\*国家自然科学基金(10704048)和上海市教育委员会科研创新项目(11YZ120)资助

Tel:021-65666454

Email:shlpu@usst.edu.cn

收稿日期:2010-04-19

修回日期:2010-06-20

向与外磁场的方向呈  $45^\circ$  角<sup>[21]</sup>. 磁流体密封于厚度为  $5.6 \mu\text{m}$  的样品盒中, 样品盒放入恒温槽内, 最后将恒温槽放置于电磁铁的两极间(两极之间的距离约为  $68 \text{ mm}$ ), 电磁铁产生的磁场平行于磁流体薄膜的表面, 且与入射光的传播方向垂直, 透过磁流体薄膜的偏振光经由检偏器后由光功率计探头接收,

光功率的大小由数字光功率计显示. 磁场的强度可通过调节电磁铁的供电电流大小来改变. 为了便于模拟环境温度的变化, 实验中的磁流体薄膜样品放置于非磁性材料制成的恒温槽内, 然后将恒温槽置于场强可调的磁场中, 恒温槽内的温度可由精密控温系统控制.

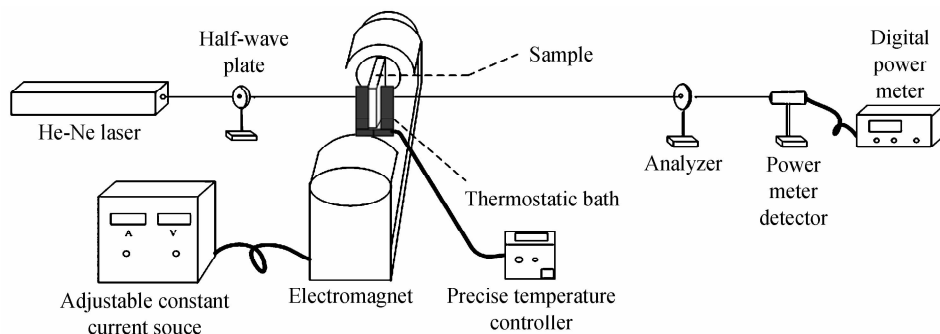


图1 研究环境温度对纳米磁流体的场诱导光学双折射影响的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for studying the influence of ambient temperature on the magnetic-field-induced birefringence of the nanomagnetic fluids

实验中所用的磁流体是油基铁氧体磁流体, 其内磁性颗粒的直径约为  $10 \text{ nm}$ . 为了比较研究不同浓度磁流体的双折射的温度特性, 本文选用了饱和磁化强度  $M_s$  分别为  $20 \text{ mT}$  和  $30 \text{ mT}$  的两种磁流体样品, 其磁性颗粒的体积百分比浓度  $\phi$  分别为  $3.6\%$  和  $5.4\%$  ( $\phi = M_s/M_d, M_d = 5600 \text{ Gs}$ <sup>[1]</sup> 为磁性颗粒的饱和磁化强度), 分别称作样品 A 和样品 B.

在外磁场作用下, 磁流体对光矢量平行于 (e 光) 和垂直于 (o 光) 磁场方向的入射光的折射率不同, 分别为  $n_e$  和  $n_o$ , 其差值  $\Delta n = n_e - n_o$ . 即为磁流体的双折射大小. 当入射线偏振光的偏振方向与外磁场方向的夹角为  $45^\circ$  时,  $\Delta n$  可表示为<sup>[22]</sup>

$$\Delta n = \sin^{-1} \frac{2 \sqrt{I_{\min}/I_{\max}} \text{ch}(h_1 - h_2)}{1 + I_{\min}/I_{\max}} \times \lambda / (2\pi d) \quad (1)$$

式中  $d$  为磁流体样品的厚度,  $\lambda$  为入射光的波长,  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为旋转检偏器时, 透射光强的极大值和极小值,  $\text{ch}$  表示双曲余弦函数,  $h_i (i=1, 2)$  分别为磁流体对 o 光和 e 光矢量的吸收系数, 故有

$$I_i = I_{0i} e^{-2h_i(B)} \quad (2)$$

式中  $I_{0i}$  为未加磁场时透过样品后的初始光强,  $I_i$  为外加磁场  $B$  后透过样品的光强,  $i=1, 2$  分别对应于 o 光和 e 光. 式(1)和(2)考虑了磁流体二向色性对双折射测量的影响, 而大多数文献在测量磁流体双折射时, 忽略了二向色性的影响, 即认为  $h_1 = h_2$  或  $\text{ch}(h_1 - h_2) = 1$ , 这是不切合实际的, 会导致双折射测量存在相对较大的误差.

由式(1)可看出, 对于给定的样品和固定的入射波长, 在某个磁场强度时, 只要测出  $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$  和  $h_i$ , 即可得出磁流体在该磁场强度下的双折射值, 而

$I_{\max}$ 、 $I_{\min}$  和  $h_i$  很容易通过旋转半波片和检偏器的方法来测量. 改变温度和磁场, 利用类似的方法即可得出不同温度和磁场下磁流体双折射值, 更换样品, 即可研究不同(浓度)样品的磁致双折射的温度特性. 故利用此方法可以方便地研究环境温度对磁流体样品双折射的影响.

## 2 实验结果与讨论

实验测量了样品 A 和 B 在不同温度时 ( $20 \sim 80^\circ\text{C}$ ) 的双折射  $\Delta n$  与磁感应强度  $B$  的关系, 结果如图 2 和 3. 由图 2 和 3 可看出, 在所研究的温度范围内, 磁流体的双折射随着外磁场的增加而增大, 并趋向于饱和. 在固定磁场下, 磁流体的双折射随着温度的升高而减小. 对于不同浓度的样品, 均具有类似的规律. 另外, 比较图 2 和 3 还可以发现, 在同一场

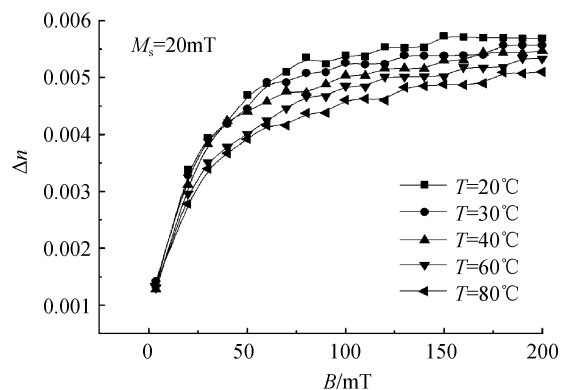


图2 样品 A 在不同温度时的双折射值  $\Delta n$  和磁感应强度  $B$  的关系

Fig. 2 The relationship between the birefringence and the applied magnetic field at different ambient temperatures for Sample A

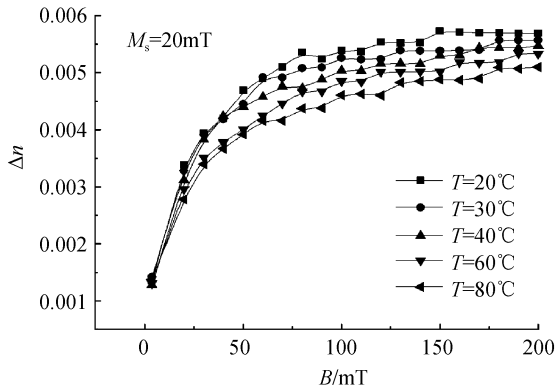


图3 样品 B 在不同温度时的双折射值  $\Delta n$  和磁感应强度  $B$  的关系

Fig. 3 The relationship between the birefringence and the applied magnetic field at different ambient temperatures for Sample B

强同一温度下,浓度大的样品的双折射值比浓度小的。

没有外磁场时,磁流体内的磁性颗粒在基液中作无规律的布朗热运动,单个磁性颗粒的磁矩取向无规则,整个磁流体不显宏观磁性,表现出宏观的各向同性,无双折射现象.在外加水平磁场(平行于薄膜表面)下,磁性颗粒的磁矩会逐步转向外场的方向,颗粒间会因磁偶极子相吸引而沿外磁场方向聚集排列,形成磁链.由于磁链的形成,磁流体样品内部结构呈现各向异性,产生双折射效应.随着磁场的增强,这种磁链的数量增多,而其尺寸及相互间的距离变小,磁流体内部的结构各向异性就加强,故双折射值就变大.当磁场足够强时,磁流体内部的磁链基本完全形成,磁链的数量、尺寸以及磁链之间的间距基本趋于稳定,磁流体趋于一种稳定的各向异性结构,故双折射随着磁场的增加趋于饱和,如图 2 和 3.

为了更清晰地看出环境温度对磁流体双折射的影响,图 4 和 5 分别给出了样品 A 和样品 B 在一系列固定磁场下的双折射与温度的关系.类似图 2 和 3,

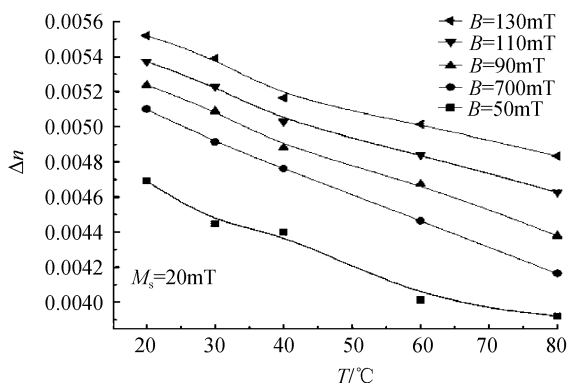


图4 样品 A 在不同外加磁场下的双折射值  $\Delta n$  与温度  $T$  的关系

Fig. 4 The relationship between the birefringence and ambient temperature at different applied magnetic fields for Sample A

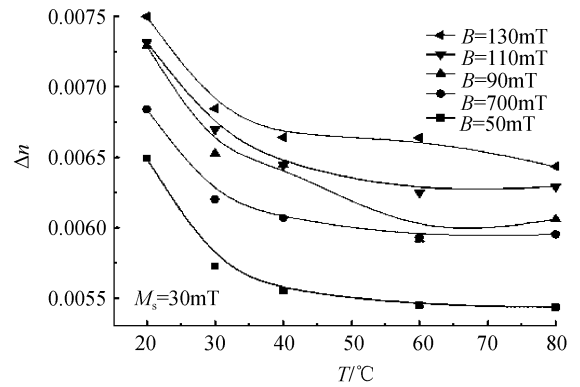


图5 样品 B 在不同外加磁场下的双折射值  $\Delta n$  与温度  $T$  的关系

Fig. 5 The relationship between the birefringence and ambient temperature at different applied magnetic fields for Sample B

图 4 和 5 表明在固定磁场强度下,磁流体的双折射随温度的增加而减小.这是由于温度越高,磁性颗粒的布朗运动越剧烈,磁性颗粒间的磁偶相互作用就越弱,已形成的磁链内的磁性颗粒间吸引力也随之减弱,一些较长的磁链有可能会断裂,磁链的长度变短,磁链之间的距离亦会随之增大,进而导致磁流体内部的结构各向异性减弱.故磁流体的双折射随温度的升高而减小.

由图 2~5 还可以看出,磁流体的双折射与其浓度有关.在相同温度和磁场强度下,磁流体的浓度越大,其双折射值就越大.这是由于相同的条件下,高浓度磁流体样品的磁链数量要多于低浓度的样品,而磁链的间距和尺寸要小于低浓度的样品,导致其结构各向异性优于低浓度的样品,所以双折射值相对较大.

图 4 和 5 的结果还表明,在实验研究的温度和磁场范围内,样品 A(低浓度)的双折射  $\Delta n$  与环境温度  $T$  基本成线性反比的关系,满足关系式  $\Delta n = C_1 T + \Delta n_{01}$ ,其中  $C_1 < 0$  和  $\Delta n_{01} > 0$  为常量;而样品 B(高浓度)的双折射  $\Delta n$  与环境温度  $T$  的关系具有双线性反比区域(小于 35 °C 和大于 35 °C)的特点,两个温度区域分别满足关系式  $\Delta n = C_2 T + \Delta n_{02}$  和  $\Delta n = C_3 T + \Delta n_{03}$ ,其中  $C_2 < 0$ 、 $C_3 < 0$ 、 $\Delta n_{02} > 0$  和  $\Delta n_{03} > 0$  均为常量.通过分析,我们认为这可能与磁流体粘度的温度依赖性有关,对于高浓度的磁流体,温度对其粘度的影响更加显著,进而导致样品 B 的双折射与温度的非线性反比关系.关于粘度以及温度和浓度引起的粘度变化对磁流体双折射的影响,将在以后的研究工作中逐步开展.

### 3 结论

实验研究了两种浓度的磁流体在一系列固定磁

场下的双折射与环境温度(20~80 ℃)的关系,得出了纳米磁流体的双折射与磁场强度、温度和磁流体浓度的关系.实验结果表明,不仅外磁场的强度以及磁流体的浓度对磁流体的场诱导光学双折射有影响,环境温度对其双折射也有很大的影响.固定磁场时,磁流体的双折射与温度成反比,与其浓度成正比.本文的研究结论表明,环境温度对磁流体双折射的影响非常显著,故基于磁流体该种效应的光学器件,应当充分考虑环境温度的影响.在实际磁流体光学器件的应用中,可设计恒温装置或采取程序温度补偿措施来提高器件的工作性能和稳定性,该结论能够为实际器件的设计和制作提供有益的参考.

#### 参考文献

- [1] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [2] WU K T, YAO Y D, CHANG C W. Variations in optical transmittance with magnetic fields in nanosized FePt ferrofluids[J]. *J Appl Phys*, 2009, **105**(7): 07B505.
- [3] JAMON D, DONATINI F, SIBLINI A, *et al.* Experimental investigation on the magneto-optic effects of ferrofluids via dynamic measurements[J]. *J Magn Magn Mater*, 2009, **321**(9): 1148-1154.
- [4] DENG H D, LIU J, ZHAO W R, *et al.* Enhancement of switching speed by laser-induced clustering of nanoparticles in magnetic fluids[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(23): 233103.
- [5] PHILIP J, LASKAR J M, RAJ B. Magnetic field induced extinction of light in a suspension of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(22): 221911.
- [6] NAIR S S, THOMAS J, SANDEEP C S S, *et al.* An optical limiter based on ferrofluids[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(17): 171908.
- [7] LLEWELLYN J P. Form birefringence in ferrofluids[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1983, **16**(1): 95-104.
- [8] TAKETOMI S. Magnetic fluid's anomalous pseudo-Cotton Mouton effects about 10<sup>7</sup> times larger than that of nitrobenzene[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1983, **22**(7): 1137-1145.
- [9] CHANTRELL R W, BRADBURY A, MENEAR S. Birefringence of weakly interacting fine particles[J]. *J Appl Phys*, 1985, **57**(1): 4268-4270.
- [10] LIU Ming, PU Sheng-li, SUN Guo-qing, *et al.* Magnetic-field-induced diffraction properties of light by the water-based magnetic liquids[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3264-3268.
- [11] LI J, LIU X D, LIN Y Q, *et al.* Field induced transmission of light in ionic ferrofluids of tunable viscosity[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2004, **37**(24): 3357-3360.
- [12] CHEN Xian-min, LI Jian, LI Qiang, *et al.* A study of the property of magneto-light transmission through CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ionic ferrofluids[J]. *J Southeast Univ*, 2008, **30**(3): 14-19.
- [13] DAI Q F, DENG H D, ZHAO W R, *et al.* All-optical switching mediated by magnetic nanoparticles[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(2): 97-99.
- [14] HONG C Y, CHIEH J J, YANG S Y, *et al.* Simultaneous identification of the low-field-induced tiny variation of complex refractive index for anisotropic and opaque magnetic-fluid thin film by a stable heterodyne Mach-Zehnder interferometer[J]. *Appl Opt*, 2009, **48**(29): 5604-5611.
- [15] LI J, LIN Y Q, LIU X D, *et al.* The modulation of coupling in the relaxation behavior of light transmitted through binary ferrofluids[J]. *Opt Commun*, 2010, **283**(6): 1182-1187.
- [16] GAO Y, HUANG J P, LIU Y M, *et al.* Optical negative refraction in ferrofluids with magnetocontrollability[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **104**(3): 034501.
- [17] WANG A R, LI J, GAO R L. The structural force arising from magnetic interactions in polydisperse ferrofluids [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, **94**(21): 212501.
- [18] LU Zhang-xian. Study on the feasibility of tunable birefringent filters with magnetic fluid film[J]. *J Univ Sci Tech Soochow*, 2007, **24**(3): 48-51.
- [19] 陆樟献. 可调谐磁性液体薄层双折射滤波器的可行性研究[J]. *苏州科技学院学报*, 2007, **24**(3): 48-51.
- [20] PU S L, DAI M, SUN G Q, *et al.* Linear birefringence and linear dichroism coupled optical anisotropy of magnetic fluids by external magnetic fields[C]. Symposium on Photonics and Optoelectronics, Wuhan: IEEE, SOPO 2009: 1-6.
- [21] HONG C Y. Optical switch devices using the magnetic fluid thin film[J]. *J Magn Magn Mater*, 1999, **201**(1-3): 178-181.
- [22] HONG C Y. Field-induced structural anisotropy in magnetic fluids[J]. *J Appl Phys*, 1999, **85**(8): 5962-5964.
- [23] DI Z Y, CHEN X F, PU S L, *et al.* Magnetic-field-induced birefringence and particle agglomeration [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(21): 211106.

## Influence of Ambient Temperature on the Magnetic-field-induced Birefringence of the Nanostructured Magnetic Fluids

PU Sheng-li, LIU Ming, SUN Guo-qing

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The relationship between the birefringence of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic fluids and the ambient temperature (in the range of  $20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) at several different magnetic field strengths (lies in  $0 \sim 200 \text{ mT}$ ) are investigated. The results show that similar dependence of birefringence on magnetic field strength and temperature happens for magnetic fluids with different concentrations. Moreover, the birefringence of the magnetic fluid is inversely proportional to the ambient temperature at fixed magnetic strength and proportional to the magnetic field strength at fixed ambient temperature. In a given temperature and magnetic field strength, the birefringence of the magnetic fluid with high concentration is larger than that with low concentration. The phenomena and results are analyzed carefully and the physical mechanism is clarified in detail.

**Key words:** Magnetic fluid; Birefringence; Temperature; Concentration; Strength of magnetic field



**PU Sheng-li** was born in 1978. He received his Ph. D. degree in 2006 from Shanghai Jiaotong University. Now he is an associate professor at College of Science, University of Shanghai for Science and Technology. His research interests focus on advanced photonic materials and magneto-optics.