

厚度对磁流体薄膜场致双折射效应的影响

王 宁 卜胜利 王昊天

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要 研究了不同浓度磁流体薄膜样品的厚度对其场致双折射的影响。结果表明,固定磁流体浓度时,其双折射随样品厚度的增加而减小,且厚度不同的样品,其双折射随磁场的增加的变化趋势不同。对于薄样品,其双折射随磁场的增加而逐渐增加直至趋于饱和,而对于厚样品,其双折射随磁场的增加呈现非单调或“振荡”变化的现象。磁流体的浓度对其双折射的厚度依赖特性具有明显的影响,浓度越高,其双折射随磁场的增加开始呈现非单调或“振荡”变化时所对应的样品厚度就越小。详细分析了薄膜样品厚度和磁流体浓度对其双折射影响的有关物理机制,并定义了转折磁场的概念进行了定量的研究。

关键词 物理光学;磁流体;双折射;厚度;浓度;转折磁场

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1131002

Influence of Sample Thickness on the Magnetic-Field-Induced Birefringence of the Nanostructured Magnetic Fluids

Wang Ning Pu Shengli Wang Haotian

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

Abstract The influence of sample thickness of different concentration magnetic fluid on the magnetic-field-induced birefringence is studied. Experimental results show that the birefringence of magnetic fluid sample decreases with the thickness of magnetic fluid with certain concentration. The variation of birefringence with the externally magnetic field strength is different for samples with different thicknesses. For the thin sample, its birefringence increases gradually with the magnetic field and then saturates at relatively high magnetic field. For the thick sample, the birefringence varies non-monotonously or oscillates with the externally magnetic field. The magnetic fluid concentration has obvious influence on the thickness-dependence of the birefringence. The higher the concentration, the smaller the thickness of the sample for the occurrence of non-monotonous or oscillating variation of birefringence with magnetic field. The underlying physical mechanisms are clarified. The transition magnetic field is defined and employed to analyze the corresponding phenomena quantitatively.

Key words physical optics; magnetic fluid; birefringence; thickness; concentration; transition magnetic field

OCIS codes 160.1190; 160.3820; 260.1440

1 引 言

磁流体是一种固液混合的特殊胶体体系,由纳米级的强磁性颗粒、水性或油性载液以及附着在磁性颗粒上的表面活性剂组成。磁流体的这种胶体体系使其能够有效地克服磁性颗粒自身的重力沉降以及磁性颗粒间的静磁相互作用,使磁性颗粒能够高度均匀地分散在载液中^[1-2]。当无外加磁场时,磁性颗粒的磁矩分布呈无序状态,磁流体宏观上不显

磁性;当有外加磁场时,磁性颗粒发生团簇并重新分布,此时磁矩呈有序态,显示出超顺磁性。磁流体这种独特的磁性和流动特性吸引了不少科技工作者的兴趣,其磁学、电学、声学特性以及在生物医学方面的应用已被广泛研究^[3-7]。在光学方面,磁流体的磁光可控性使其具有重要的潜在应用价值,因而逐渐受到重视。近来,磁流体的光学和磁光性质的理论和实验研究取得了较大的进展^[8-13],在磁流体与

收稿日期: 2013-04-27; **收到修改稿日期:** 2013-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(10704048)、上海市教育委员会科研创新项目(11YZ120)、上海市自然科学基金(13ZR1427400)

作者简介: 王 宁(1986—),男,硕士研究生,主要从事磁流体光学性质方面的研究。E-mail: wn2006201176@126.com

导师简介: 卜胜利(1978—),男,博士,副教授,主要从事新型光学功能材料和光子器件等方面的研究。

E-mail: shlpu@usst.edu.cn(通信联系人)

其他光学器件结合形成新的光学功能器件的研究方面也有所突破。例如磁场作用下磁流体折射率的可调性、法拉第旋光效应、热透镜效应、双折射效应等^[14-16],利用这些特性可以实现多种潜在光学功能器件,如利用磁流体折射率可调性结合光纤技术可以制成光纤调制器,利用热透镜效应可制成光限幅器,利用磁致双折射效应可以实现光学衰减器、光开关等光学功能器件^[17-19]。

关于磁流体磁致光学双折射现象的研究工作开展得较早,Llewellyn^[20]于20世纪80年代首先对磁流体在可见光波段内的双折射和二向色性进行了研究。之后,Taketomi^[21]和Chantrell等^[22]基于磁性颗粒聚集成链状结构和粒子对模型,得出了磁流体场致光学双折射的理论。该理论的建立使得磁流体光学研究迅速发展成一个重要的方向并逐渐形成系统,其间不断涌现出各种新兴的研究方向。近期,在温度、非磁性微球和5CB向列液晶掺杂对磁流体场致双折射的影响等方面开展了一些工作^[23-25],对基于磁流体双折射效应的光学应用拓展具有一定的参考价值。

目前关于磁流体双折射效应的研究均是以某一厚度薄膜样品作为研究对象,未见有样品厚度对磁流体双折射效应影响的研究报道。磁流体样品的厚度与其双折射大小的关系到底如何、是否有最佳的样品厚度等这些问题目前均不能很好地回答,对相关器件的应用和性能优化设计不利。本文将对不同厚度和不同浓度磁流体薄膜样品的场致双折射特性进行详细的研究。

2 实 验

为了研究磁流体样品厚度对其场诱导光学双折射特性的影响,实验制作了厚度 d 分别为0.17、

0.26、0.30、0.40、0.56 mm的样品盒,每一个厚度制作了三个不同浓度的磁流体样品。实验用磁流体是由日本Ferrotec公司提供的EXP08105型油基铁氧体磁流体,其磁性颗粒直径约为10 nm,磁性颗粒体积分数为1.87%,饱和磁化强度为10 mT。利用液体石蜡将初始磁流体稀释成磁性颗粒体积分数分别为0.4675%、0.6233%和0.7480%的三种磁流体,分别记作磁流体a、磁流体b和磁流体c。稀释过程中利用超声处理混合溶液约2 h,使得稀释后的磁流体具有较好的分散稳定性。最后将制得的不同浓度磁流体注入到不同厚度的样品盒中,密封标记,以备实验、测量。

测量磁流体场致双折射特性的实验装置如图1所示,氦氖激光器产生波长为632.8 nm的线偏振光,经过半波片后,再通过置于磁场中的样品。磁场方向与样品盒的表面平行,光的传播方向与样品盒表面垂直,磁场大小由加载在电磁铁线圈上的电流大小调节。实验中电磁铁两极间的距离不变,样品固定在电磁铁两极间的中心位置以保证施加在样品上的磁场具有较好的均匀性。透过样品的光通过检偏器后由数字光功率计探测显示。该测量系统中,当入射光的偏振方向与磁场方向成 45° 角时,具有最大的双折射测量灵敏度^[26]。实验中通过调整半波片使得样品前入射光的偏振方向与外加磁场方向成 45° 角。此时样品对垂直于(o光)和平行于(e光)磁场方向的光矢量的折射率差值即为双折射 Δn ,同时考虑磁流体的二向色性,则 Δn 可表示为^[27]

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

式中 d 为磁流体样品的厚度, λ 为入射光波长, I_{\max}

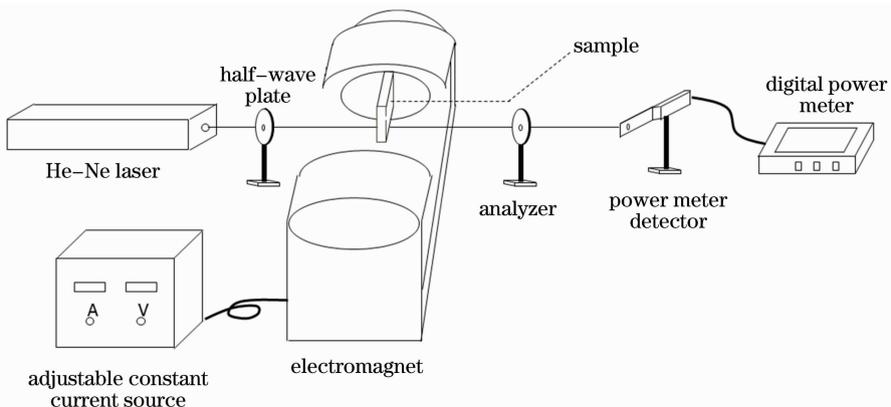


图1 研究磁流体场致双折射特性的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for studying the magnetic-field-induced birefringence of magnetic fluids

和 I_{\min} 为旋转检偏器时测得的透射光强极大值和极小值, 双曲余弦函数 $\text{ch}(h_1 - h_2)$ 表示二向色性对双折射的影响, $h_i (i = 1, 2)$ 分别为磁流体对 o 光和 e 光电矢量的吸收系数, 可表示为

$$I_i = I_{0i} \exp[-2h_i(B)], \quad (2)$$

式中 I_{0i} 为不加磁场时透过样品的初始光强, I_i 为不同磁场下透过样品的 o 光或 e 光光强. 利用(1)式和(2)式, 通过测量不同磁场下 I_{\max} 、 I_{\min} 、 I_i 和 I_{0i} 的值即可计算得到磁流体的双折射 Δn 随磁场强度的变化关系; 更换待测样品, 便可得到不同厚度和不同浓度样品的双折射.

3 结果与讨论

分别测量了三种浓度磁流体各 5 个不同厚度薄膜样品的双折射 Δn , 结果如图 2~4 所示. 由图 2~4 可看出, 不同浓度和不同薄膜厚度样品的 Δn 开始均随磁场的增加而增大; 对于薄样品, 其 Δn 随磁场的进一步增加而继续增大, 但增速逐渐减慢并趋于饱和; 对于厚样品, 当磁流体浓度较小时(磁流体 a 和磁流体 b), 其 Δn 随着磁场的进一步增加到最大值后开始下降(见图 2 和 3), 而当磁流体浓度较大时(磁流体 c), 其 Δn 却随着磁场的持续增加呈现先增大后减小然后再增大的变化趋势, 即“振荡”现象(见图 4 中 d 为 0.40 mm 和 0.56 mm 的样品).

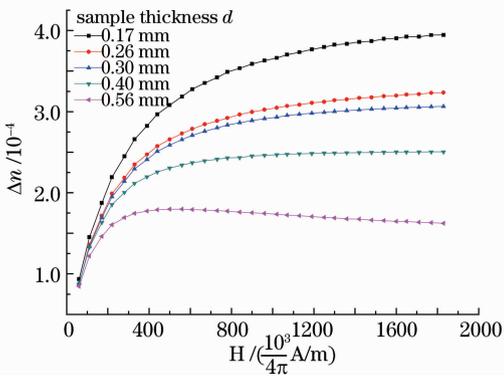


图 2 磁流体 a 制成的不同厚度样品的双折射随磁场强度的变化关系

Fig. 2 Birefringence of magnetic fluid a with different sample thicknesses as a function of magnetic field strength

无外加磁场时, 磁流体内部的颗粒随着布朗热运动随机分布, 处于各向同性的状态; 当有外加磁场时, 磁流体内部磁性颗粒会聚合形成沿着外磁场方向的链状或柱状结构, 原先的各向同性被破坏, 导致各向异性, 从而产生了磁流体的场致光学双折射 Δn

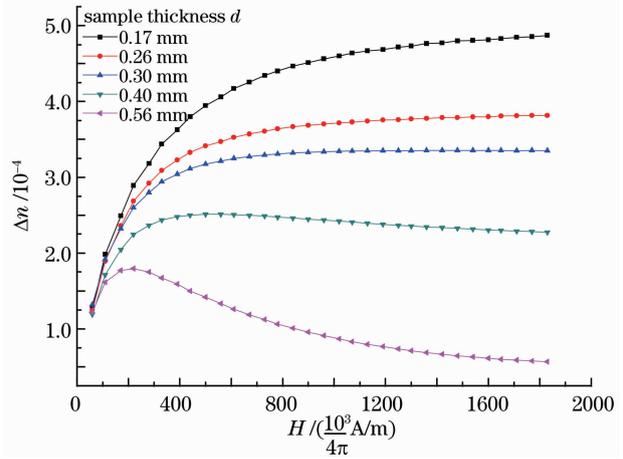


图 3 磁流体 b 制成的不同厚度样品的双折射随磁场强度的变化关系

Fig. 3 Birefringence of magnetic fluid b with different sample thicknesses as a function of magnetic field strength

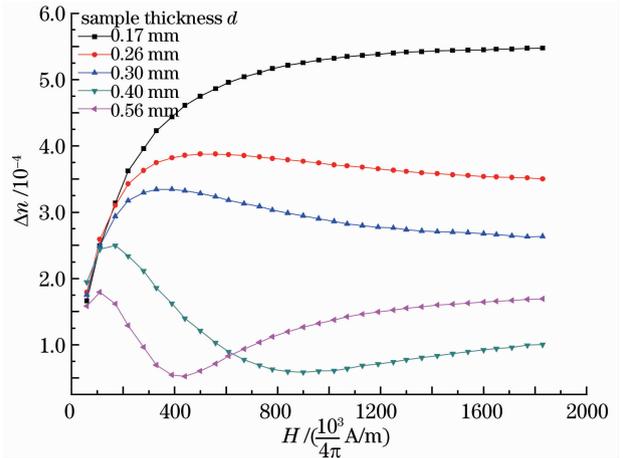


图 4 磁流体 c 制成的不同厚度样品的双折射随磁场强度的变化关系

Fig. 4 Birefringence of magnetic fluid c with different sample thicknesses as a function of magnetic field strength and dichroism phenomenon. In low magnetic field, with the increase of the magnetic field, the magnetic chain initially forms, and the degree of anisotropy continuously increases, so in low magnetic field Δn increases with the magnetic field strength, and the relationship between Δn and the thickness of the sample and the concentration of the magnetic fluid is not large (see Fig. 2~4 low magnetic field part).

对于薄样品, 随着磁场的进一步增加, 磁流体内部磁性颗粒沿磁场方向形成磁链的长度不断地增加直至趋于饱和, 而磁链越长磁流体的各向异性程度就越大, 导致其 Δn 越大, 因此 Δn 随着磁场强度的继续增加而逐渐增加并趋于饱和. 对于厚样品, 随着磁场的进一步增加, 磁链的排列分布要比薄样品复杂, 沿着厚度方向可能会存在多个磁链有序排列分布面, 不同排列分布面之间可能会存在交织和相互

作用进而导致高磁场时厚样品的 Δn 随磁场非单调或“振荡”变化的现象发生。

图 2~4 还表明,在“振荡”现象发生前, Δn 随着样品厚度的增加而减小。当磁流体浓度一定时,不同厚度薄膜样品沿磁场方向的磁链有序程度基本相同,但垂直于厚度方向的磁链分布情况与样品的厚度有关。对于薄样品,垂直于厚度方向的磁链排列分布面的数量较少,面与面之间的影响较小,此时磁流体内部的各向异性主要取决于沿磁场方向的磁链的有序程度;随着厚度的增加,磁流体磁链的分布面增多,面与面之间的相互影响和交错效应增强,使得在光束截面上平行于磁场方向和垂直于磁场方向的磁链有序度的差异变小,亦即各向异性程度降低,从而导致 Δn 降低。厚度越大,面与面之间的相互影响和交错效应就越强,因此就越容易出现 Δn 非单调或“振荡”变化的现象。

由图 2~4 还可看出,浓度越大的磁流体,其厚度的影响越明显。例如,由磁流体 b 制成的样品,当厚度 d 为 0.40 mm 时,其 Δn 随磁场才开始出现非单调变化的现象(见图 3),而由较低浓度的磁流体 a 制成的样品,其厚度为 0.40 mm 时, Δn 随磁场是单调增加的(见图 2),由较高浓度的磁流体 c 制成的样品,其厚度为 0.26 mm 时,就已出现 Δn 随磁场非单调变化的现象(见图 4),且当厚度较大时(d 为 0.40 mm 和 0.56 mm), Δn 随磁场呈现“振荡”的现象。浓度高的样品中的磁链更长,也就更容易受到其他因素的影响而断裂,这在较薄样品中体现不明显,当样品厚度增大时,磁链有序排列分布面的数量增多,相互间的影响和作用增强,较长的磁链容易断裂,导致各向异性程度减弱,即 Δn 减小。但当其各向异性下降到一定程度以后,由于磁场的作用又会使断裂的磁链重新组装成链,于是各向异性又开始增强, Δn 开始增大,此时由于磁场强度已足够大,磁性颗粒间的磁偶极子相互作用力较大,磁链不容易断裂,各向异性趋于稳定,即 Δn 渐渐趋于稳定,这与图 4 中 0.40 mm 和 0.56 mm 厚度样品在高磁场时($H > 900 \times \frac{10^3}{4\pi}$ A/m 和 $450 \times \frac{10^3}{4\pi}$ A/m)其 Δn 随磁场强度的变化趋势是吻合的。因此,对于高浓度厚样品,较易出现 Δn 随磁场“振荡”的现象。另外,图 2~4 显示, Δn 随浓度的增加而增加,这是由于高浓度磁流体的饱和磁化强度较大,相同条件下沿磁场方向产生的磁链有序度较大。

为了定量研究厚度对磁流体薄膜样品双折射特

性的影响,定义 Δn 随磁场增加开始下降时所对应的磁场强度为转折磁场 H_t 。图 5 和图 6 给出了转折磁场 H_t 随磁流体浓度和样品厚度的变化关系。图 5 和图 6 表明,转折磁场随磁流体浓度和样品厚度的增加而减小。因此,在磁流体双折射值随磁场强度发生非单调或者“振荡”变化方面,增加样品的厚度和增大磁流体的浓度具有同样的效果。而在双折射的绝对数值大小方面,增加样品的厚度会降低磁流体样品的双折射值,增大磁流体的浓度会增大样品的双折射值。因此,在基于磁流体双折射效应的应用方面,若需要较大的磁流体双折射,可适当地增大磁流体的浓度,但要注意避免发生非单调或者“振荡”现象的发生,即磁流体的浓度不宜选择过大。反之,在需要尽量避免磁流体双折射效应发生的场合,可适当地选择较低浓度的磁流体、增大薄膜样品的厚度。

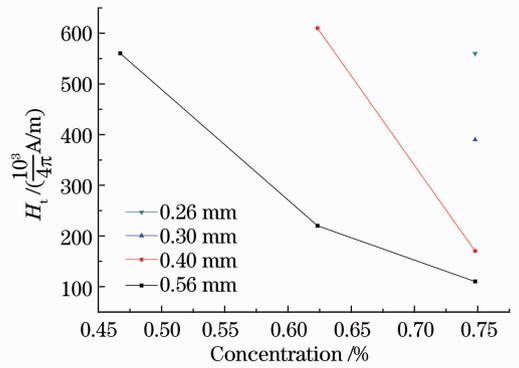


图 5 转折磁场随磁流体浓度的变化关系

Fig. 5 Transition magnetic field as a function of magnetic fluid concentration

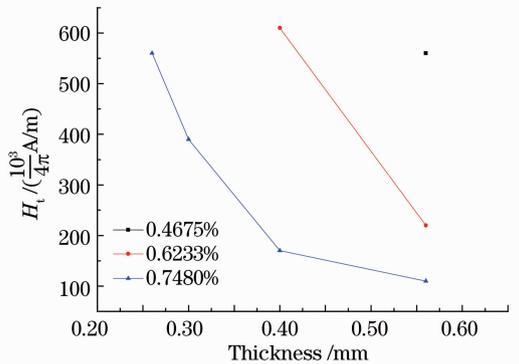


图 6 转折磁场随磁流体样品厚度的变化关系

Fig. 6 Transition magnetic field as a function of magnetic fluid sample thickness

总之,厚度给样品带来的“面”间交错与影响,使其各向异性降低,当厚度增加到一定程度后,由于磁流体内部团聚结构的改变而发生 Δn 随磁场的非单

调变化或者“振荡”现象。增加磁流体的浓度会使磁性颗粒团聚的磁链增长,各向异性增加,当浓度增大到一定程度后,同样由于磁流体内部团聚结构的变化, Δn 随磁场发生非单调变化或者“振荡”的现象。

4 结 论

实验研究了三个浓度的磁流体制成不同厚度的薄膜样品时,其双折射随磁场强度的变化关系,得出了磁流体浓度、样品厚度对其双折射影响的规律。实验结果表明,高浓度磁流体和厚薄膜样品容易产生双折射随磁场强度非单调或者“振荡”变化的现象,增加薄膜样品的厚度会降低磁流体双折射值,而增加磁流体的浓度会增大薄膜样品的双折射。因此,在利用磁流体双折射效应的光学器件中应充分考虑薄膜样品厚度和磁流体浓度对双折射的影响。这些结果有益于基于磁流体双折射效应的光学器件的设计和性能优化。

参 考 文 献

- R E Rosensweig. Ferrohydrodynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- Pu Shengli, Chen Xianfeng. Dispersion stability requirements of the nanostructured magnetic liquid [J]. J Univ Shanghai Sci Technol, 2008, 30(4): 335-338.
卜胜利, 陈险峰. 纳米磁性液体的分散稳定性分析[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(4): 335-338.
- Wang Xufei, Shi Liqun. Polydispersity effects on the magnetization of diluted ferrofluids; a lognormal analysis [J]. Chin Phys B, 2010, 19(10): 107502.
- Pu Shengli. Influence of Brownian motion on the electrical properties of a nanostructured magnetic fluid [J]. J Univ Shanghai Sci Technol, 2009, 31(6): 517-520.
卜胜利. 布朗运动对纳米磁流体电学特性的影响[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(6): 517-520.
- Józefczak, A Skumiel, M Łabowski. Effects of the sweep rate of the magnetic field on the changes of ultrasonic wave velocity in magnetic fluid [J]. J Magn Magn Mater, 2003, 258-259: 474-476.
- H Lee, A M Purdon, R M Westervelt. Manipulation of biological cells using a microelectromagnet matrix [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(6): 1063-1065.
- S Y Park, H Handa, A Sandhu. Magneto-optical biosensing platform based on light scattering from self-assembled chains of functionalized rotating magnetic beads [J]. Nano Lett, 2010, 10(2): 446-451.
- K T Wu, Y D Yao, C W Chang. Variations in optical transmittance with magnetic fields in nanosized FePt ferrofluids [J]. J Appl Phys, 2009, 105(7): 07B505.
- D Jamon, F Donatini, A Siblini, *et al.*. Experimental investigation on the magneto-optic effects of ferrofluids via dynamic measurements [J]. J Magn Magn Mater, 2009, 321(9): 1148-1154.
- H D Deng, J Liu, W R Zhao, *et al.*. Enhancement of switching speed by laser induced clustering of nanoparticles in magnetic fluids [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(23): 233103.
- J Philip, J M Laskar, B Raj. Magnetic field induced extinction of

- light in a suspension of Fe₃O₄ nanoparticles [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(22): 221911.
- Zu Peng, Xiang Wanghua, Bai Yangbo, *et al.*. A novel fiber Sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806005.
祖 鹏, 向望华, 白扬博, 等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0806005.
- Lu Zhangxian, Wang Jun, Xia Sihua. Study on optical properties of kerosene-based Fe₃O₄ magnetic liquid film [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0216003.
陆樟献, 王 军, 夏肆华. 煤油基 Fe₃O₄ 磁性液体薄层的光学特性研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0216003.
- S S Nair, J Thomas, C S S Sandeep, *et al.*. An optical limiter based on ferrofluids [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(17): 171908.
- P C Scholten. Magnetic measurements on particles in suspension [J]. IEEE Trans Magn, 1975, 11(5): 1400-1402.
- V Socoliuc, M Raşa, V Sofonea, *et al.*. Agglomerate formation in moderately concentrated ferrofluids from static magneto-optical measurements [J]. J Magn Magn Mater, 1999, 191(1-2): 241-248.
- P Zu, C C Chan, L W Siang, *et al.*. Magneto-optic fiber Sagnac modulator based on magnetic fluids [J]. Opt Lett, 2011, 36(8): 1425-1427.
- Wang Haotian, Pu Shengli, Wang Ning. Theoretical design of threshold-tunable optical limiters based on the thermal lens effect of magnetic fluids [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1009-1014.
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.
- A K Bentley, A B Ellis, G C Lisensky, *et al.*. Suspensions of nickel nanowires as magneto-optical switches [J]. Nanotechnol, 2005, 16(10): 2193-2196.
- J P Llewellyn. Form birefringence in ferrofluids [J]. J Phys D: Appl Phys, 1983, 16(1): 95-104.
- S Taketomi. Magnetic fluid's anomalous pseudo-Cotton Mouton effects about 10⁷ times larger than that of nitrobenzene [J]. Jpn J Appl Phys, 1983, 22(7): 1137-1145.
- R W Chantrell, A Bradbury, S Menear. Birefringence of weakly interacting fine particles [J]. J Appl Phys, 1985, 57(8): 4268-4270.
- Pu Shengli, Liu Ming, Sun Guoqing. Influence of ambient temperature on the magnetic-field-induced birefringence of the nanostructured magnetic fluids [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(10): 1742-1746.
卜胜利, 刘 明, 孙国庆. 环境温度对纳米磁流体场诱导光学双折射的影响[J]. 光子学报, 2010, 39(10): 1742-1746.
- Sun Guoqing, Pu Shengli, Liu Ming, *et al.*. Influence of nonmagnetic microsphere doping on magnetic-field-induced birefringence of nanostructured magnetic fluids [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 652-657.
孙国庆, 卜胜利, 刘 明, 等. 非磁性微球掺杂对纳米磁流体场诱导双折射特性的影响[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 652-657.
- Wang Xiang, Pu Shengli, Ji Hongzhu, *et al.*. Enhanced magnetic-field-induced optical properties of nanostructured magnetic fluids by doping nematic liquid crystals [J]. Nanoscale Research Lett, 2012, 7: 249-255.
- C Y Hong. Field-induced structural anisotropy in magnetic fluids [J]. J Appl Phys, 1999, 85(8): 5962-5964.
- Di Ziyun, Chen Xianfen, Pu Shengli, *et al.*. Magnetic-field-induced birefringence and particle agglomeration [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(21): 211106.