

doi: 10.3788/gzxb20124105.0614

基于几何遮蔽效应和法拉第旋光效应耦合的 磁流体偏振光透过率

卜胜利, 纪红柱, 于国君, 王响

(上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘 要:根据几何遮蔽效应和法拉第旋光效应耦合原理给出的解析表达式,通过数值模拟计算,研究了磁流体的纵场诱导偏振光透过率及磁流体的浓度、液态介电常量、磁性颗粒磁偶极矩热能比和单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量四个参量的变化对其偏振光透过率的影响.结果表明,磁流体的浓度、液态介电常量和磁性颗粒磁偶极矩热能比对其偏振光透过率有显著影响,低浓度样品的偏振光透过率随着纵向磁场强度的增大而线性增加,而高浓度样品则随着纵向磁场强度的增大呈现振荡变化的特性.在一定范围内,磁流体偏振光透过率随其液态介电常量 ϵ_{liquid} 和磁性颗粒磁偶极矩热能比 $\mu_d/(kT)$ 的变大而增加.而单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量对其偏振光透过率没有影响,磁流体参量依赖的偏振光透过率在低磁场区域和高磁场区域有明显区别.提出了磁流体纵场诱导偏振光透过率在几类光子器件中的可能应用.

关键词:磁流体;几何遮蔽效应;法拉第旋光效应;光学透过率;光子器件

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)05-0614-5

0 引言

磁流体是纳米级的磁性颗粒分散在载液中所形成的稳定胶体体系,它既具有液态物质的流动性,又具有磁性物质的强磁性,通常呈现超顺磁性,是一种新型的功能材料.近年来,磁流体被发现具有许多独特的光学特性,如:光学各向异性^[1],自组装^[2],场诱导光学透过率^[3-4],非线性光学特性^[5],光子晶体效应^[6-11].磁流体的光学性质强弱可由外磁场调节使其具有很好的光学应用前景,引起了光学材料和光器件领域学者的极大兴趣,一些基于磁流体的新型光学器件已被提出并在实验室内被演示^[12-14].在光学应用上,材料的光学透过率是一个基本参量,但磁流体不同于传统的固态光学材料,它在外加磁场的作用下其内部的磁性颗粒会沿磁场的方向团聚成链状结构,进而导致其光学透过率与外加磁场强度和入射光的偏振方向均有关,因此深入研究磁流体的光学透过率对其应用具有重要的意义.

当前文献对磁流体的场诱导光学透过率的研究主要分成两类:横场诱导和纵场诱导.横场诱导是指外加磁场的方向与入射光的传播方向垂直,此时在外加磁场的作用下,磁流体会呈现出二向色性和双

折射,关于此方面已有广泛而深入的研究报导.纵场诱导是指外加磁场的方向与入射光的传播方向平行,此时在外加磁场的作用下,磁流体会呈现出法拉第旋光效应,当线偏振光通过磁流体时,光学透过率的变化通常是由几何遮蔽效应^[15]和法拉第旋光效应共同作用的结果.当前文献在研究磁流体纵场诱导光学特性时,通常仅考虑几何遮蔽效应,而忽略了法拉第旋光效应,或者仅考虑法拉第旋光效应,而忽略了几何遮蔽效应.

文献^[16]考虑了几何遮蔽效应和法拉第旋光效应耦合的情况下,对纵场诱导磁流体偏振光透过率进行了一定的理论研究和实验验证,但未曾对不同参量的影响进行详细的讨论.本文将详细讨论磁流体的浓度、磁流体载液的种类、磁性颗粒磁偶极矩热能比和单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量对磁流体纵场诱导偏振光透过率的影响,为基于磁流体的偏振光学器件的设计、性能优化提供有益的参考,促进磁流体光学和应用的发展.

1 理论基础

对于一种油基铁氧体磁流体,在纵场作用下,当用线偏振光入射样品时,透射光经过置于样品后的

基金项目:国家自然科学基金(No. 10704048)和上海市教育委员会科研创新项目(No. 11YZ120)资助

第一作者:卜胜利(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为新型光学功能材料和光子器件. Email: shlpu@usst.edu.cn

收稿日期:2011-09-14; **修回日期:**2011-12-05

检偏器(为了获得最大的灵敏度,检偏器的透振方向与入射线偏振光的偏振方向成 45° 夹角)后,其功率可表示为^[16]

$$P = [76.58245 - 17.00193 \exp(-1.04473 \times 10^{-5} H^2)] t \cos^2 \{45^\circ - [2\pi(d/\lambda) \epsilon_{xy} \varphi'_s L(\xi) \cdot L(\xi')]/[(1+Q)^2 \sqrt{\epsilon_{\text{liquid}}} \cdot \sqrt{1 + \varphi'_s L(\xi) P[1 + QL(\xi')/\xi']}] \} \quad (1)$$

式中 H 为外加磁场强度, t 为检偏器的透过率, d 为磁流体样品的厚度, λ 为入射激光的波长, ϵ_{xy} 为磁流体介电张量的非对角量, φ'_s 为磁性颗粒团聚体的饱和体积百分比浓度. $Q = \epsilon_{\text{solid}}/\epsilon_{\text{liquid}}$, $P = (\epsilon_{\text{solid}} - \epsilon_{\text{liquid}})/(\epsilon_{\text{solid}} + \epsilon_{\text{liquid}})$, 其中 ϵ_{solid} 和 ϵ_{liquid} 分别为磁性颗粒团聚体和余下液态磁流体的介电常量. $L(\xi) = \coth(\xi) - 1/\xi$, $L(\xi') = \coth(\xi') - 1/\xi'$, 其中 $\xi = \mu_0 V_0 M_d H / (kT)$, $\xi' = \mu_0 (\beta N_0)_s V_0 M_d L(\xi) (H + H_w) / (kT)$. μ_0 为真空中的磁导率, $V_0 = 4\pi r^3/3$ 为单个磁性颗粒的体积, r 为单个磁性颗粒的半径, M_d 为磁性颗粒的饱和磁化强度, k 为玻耳兹曼常量, T 为磁流体的绝对温度. β 为接近 1 的常量($\beta < 1$)^[17], N_0 为磁性颗粒团聚体中所含磁性颗粒的数量, H_w 为外斯内场(反映磁性颗粒间的相互作用), $(\beta N_0)_s$ 为 βN_0 的饱和值.

式(1)给出了几何遮蔽效应和法拉第旋光效应耦合情况下,磁流体的偏振光透射功率,它与磁流体的诸多参量有关.为了定量地得出不同磁流体参量对其偏振光透过率的影响,在没有特别指出的情况下,式(1)中各参量数值为 $d = 200 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $\epsilon_{xy} = 0.1$, $\varphi'_s = 0.01784$, $\epsilon_{\text{solid}} = 4.5$, $\epsilon_{\text{liquid}} = 2.56$, $r = 5 \text{ nm}$, $M_d = 4.46 \times 10^5 \text{ A/m}$, $T = 295 \text{ K}$, $(\beta N_0)_s = 3 \times 10^8$, $H_w = 200 \text{ Oe}$. 由于本文关注的是光学透过率,而不是绝对透射功率(与入射功率有关),故在理论模拟计算时, t 可不考虑.

2 结果与讨论

由式(1)可看出,磁流体在纵场诱导下的偏振光透过率与磁性颗粒团聚体的饱和体积百分比浓度(φ'_s)、磁流体载液的种类(影响 ϵ_{liquid} 的数值)、磁性颗粒磁偶极矩热能比($\mu_0 V_0 M_d / (kT)$)、单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量(近似等于 $(\beta N_0)_s$)等主要参量有关.

2.1 磁流体浓度的影响

磁性颗粒团聚体的饱和状态是指磁流体中的所有磁性颗粒均团聚成团聚体的极限状态,故磁性颗粒团聚体的饱和体积百分比浓度 φ'_s 等于磁流体的体积百分比浓度 φ (所有磁性颗粒的体积和与磁流

体总体积的比值),即 $\varphi'_s = \varphi$. 图 1 为体积百分比浓度 φ 分别为 0.01784%、0.1784%、1.784%、17.84% 和 80% 磁流体样品的偏振光透过率随着纵向磁场强度的变化关系. 由图 1 可看出,低浓度样品($\varphi = 0.01784\%$ 、 0.1784% 和 1.784%)的偏振光透过率随着纵向磁场强度的增大而线性增加,而高浓度样品($\varphi = 17.84\%$ 和 80%)的偏振光透过率随着纵向磁场强度的增大呈现振荡变化的特性,且浓度越大,振荡特性越显著. 这是由于对于低浓度的样品,法拉第旋光效应较弱,几何遮蔽效应大于法拉第旋光效应的影响,起主导作用,故其偏振光透过率随着纵向磁场强度的增大而线性增加. 对于高浓度样品,法拉第旋光效应较强,其对偏振光透过率的影响大于几何遮蔽效应的影响,且法拉第旋光角度已大于 45° ,进而导致偏振光透过率随着纵向磁场强度的增大呈现振荡变化的特性. 另外,浓度越大,法拉第旋光角度就越大,故振荡特性就越显著. 图 1 还表明,对于低浓度的样品,在低磁场强度时,其偏振光透过率随外加磁场强度的变化较明显,而在高磁场强度时,其偏振光透过率随外加磁场强度的增大而趋于饱和. 对于高浓度的样品,其振荡变化的峰值也随着外加磁场强度的增加而变大,最后趋于稳定值. 这是由于在低磁场时,磁流体内部磁性颗粒的团聚程度随着外加磁场强度的增加而增加,进而导致几何遮蔽效应和法拉第旋光效应随外加磁场强度的增加而增加,所以偏振光透过率和振荡峰值随磁场变化较大,而在高磁场强度时,磁流体内部磁性颗粒的团聚过程趋于稳定,团聚程度随外加磁场强度的进一步变化较小,所以偏振光透过率和振荡峰值随磁场变化较小.

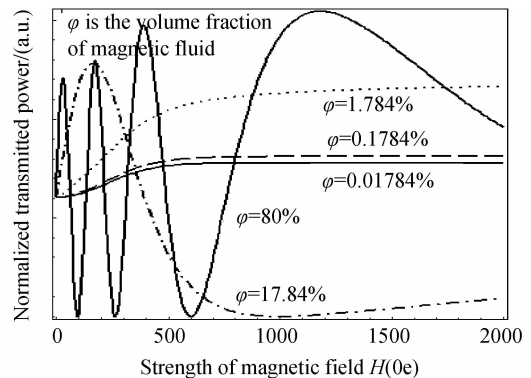


图 1 磁流体浓度对其纵场诱导偏振光透过率的影响
Fig. 1 Influence of magnetic fluid concentration on the polarized light transmittance of magnetic fluid under externally longitudinal magnetic field

2.2 磁流体载液种类的影响

在实际应用中,根据应用场合和环境的不同,要选用恰当载液的磁流体. 载液类型不同,会导致液态

介电常量 ϵ_{liquid} 不同,进而会影响磁流体纵场诱导偏振光透过率.图 2 为取液态介电常量 ϵ_{liquid} 分别为 1、2、2.56、3、4 和 4.5 时,磁流体样品的偏振光透过率随着纵向磁场强度的变化关系.图 2 表明,在恒定外加磁场强度下,磁流体的偏振光透过率随液态介电常量 ϵ_{liquid} 的变大而增加,特别是在高磁场区域.磁流体偏振光透过率对外加磁场强度变化的敏感程度也随着液态介电常量 ϵ_{liquid} 的变大而增加,特别是在低磁场区域.由图 2 还可以看出,在液态介电常量 ϵ_{liquid} 恒定的情况下,磁流体偏振光透过率对外加磁场强度变化的敏感程度在低磁场区域要大于高磁场区域的情况.这是由于磁流体内部的磁性颗粒团聚程度随外加磁场强度的变大而增加,最后趋于饱和,进而导致几何遮蔽效应和法拉第旋光效应在高磁场时趋于饱和.

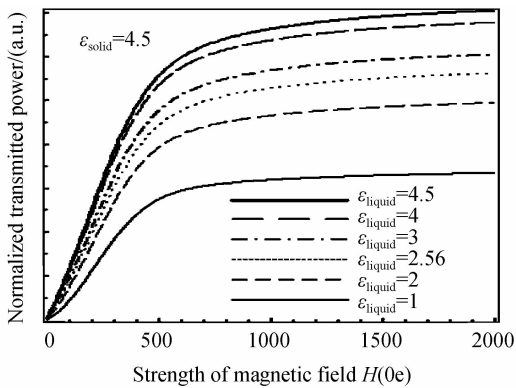


图 2 磁流体载液种类对其纵场诱导偏振光透过率的影响
Fig. 2 Polarized light transmittance of magnetic fluid under externally longitudinal magnetic field for several samples with different liquid carriers

2.3 磁性颗粒磁偶极矩热能比的影响

磁性颗粒的磁偶极矩热能比为 $\mu_d/(kT) = \mu_0 V_0 M_d / (kT)$,当磁性颗粒的尺寸或类型不同时, $\mu_d/(kT)$ 的值就会不同,而实际磁流体的磁性颗粒尺寸或类型可有多种,因此有必要讨论磁流体中磁性颗粒的磁偶极矩热能比 $\mu_d/(kT)$ 对其纵场诱导偏振光透过率的影响.图 3 给出了磁性颗粒的磁偶极矩热能比为 $\mu_d/(kT) = 0.000005736306902$ 、 0.00005736306902 、 0.0005736306902 、 0.005736306902 、 0.05736306902 、 0.5736306902 和 5.736306902 时,磁流体样品的偏振光透过率随着纵向磁场强度的变化关系.由图 3 可看出,当 $\mu_d/(kT)$ 的值较小(如:0.000005736306902、0.00005736306902)或者较大(如:0.5736306902、5.736306902)时,其对磁流体纵场诱导偏振光透过率的影响很小,而当 $\mu_d/(kT)$ 的值适中时,在恒定外加磁场强度下,磁流体的纵场诱导偏振光透过率随 $\mu_d/(kT)$ 值的增加而增大.对于固定的磁偶极矩

热能比 $\mu_d/(kT)$,磁流体样品的纵场诱导偏振光透过率与外加磁场强度的关系与不同磁流体载液的影响情况类似,其产生的物理机理也类似,故在此不再赘述.

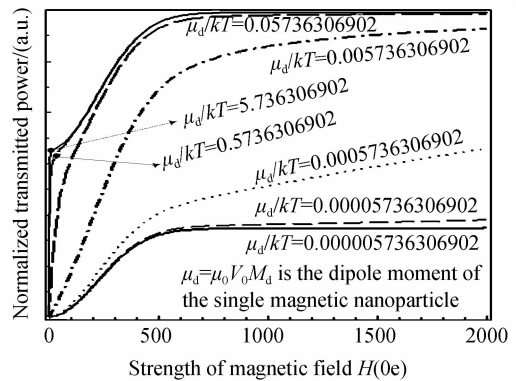


图 3 磁性颗粒磁偶极矩热能比对磁流体纵场诱导偏振光透过率的影响

Fig. 3 Influence of $\mu_d/(kT)$ on the polarized light transmittance of magnetic fluid under externally longitudinal magnetic field

2.4 单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量的影响

磁流体内部每个磁性颗粒团聚体中所含磁性颗粒的总数近似等于 $(\beta N_0)_s$ 的数值.本文把 $(\beta N_0)_s$ 的数值设置在一个很宽的范围内变化,然后进行数值模拟计算,结果表明单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量对磁流体的纵场诱导偏振光透过率没有影响.图 4 为 $(\beta N_0)_s$ 的值在 3×10^2 和 3×10^8 间变化时,磁流体的纵场诱导偏振光透过率与外加磁场强度的关系.由图 4 可看出,不同单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量的透过率曲线均重合.

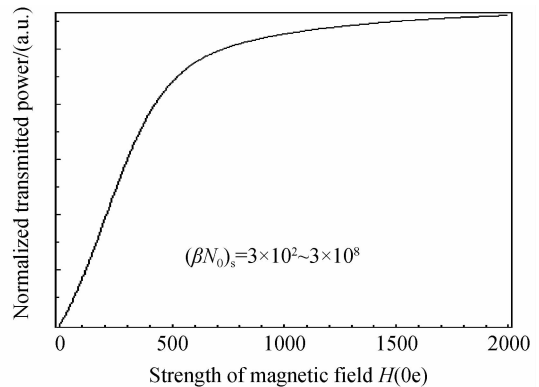


图 4 单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量对磁流体纵场诱导偏振光透过率的影响

Fig. 4 Influence of $(\beta N_0)_s$ on the polarized light transmittance of magnetic fluid under externally longitudinal magnetic field

图 1 至图 4 给出的磁流体纵场诱导偏振光透过率结果表明,在纵场配置时,工作在线偏振光下的磁流体可用来制作光衰减器、光开关、光调制器等新型光子器件.磁流体的场诱导偏振光透过率与磁性颗粒团聚体的饱和体积百分比浓度、磁流体载液的种

类、磁性颗粒磁偶极矩热能比、外加磁场强度的高低等诸多参量有关,这非常有利于设计和制作一些可调谐光子器件,将有很好的光学应用前景。

3 结论

理论模拟了纵场诱导下几何遮蔽效应和法拉第旋光效应耦合对磁流体偏振光透过率的影响,结果表明,磁流体的诸多参量对其偏振光透过率有显著影响.低浓度样品的偏振光透过率随着纵向磁场强度的增大而线性增加,而高浓度样品则随着纵向磁场强度的增大呈现振荡变化的特性.在一定范围内,磁流体偏振光透过率随其液态介电常量 ϵ_{liquid} 和磁性颗粒磁偶极矩热能比 $\mu_d/(kT)$ 的变大而增加.而磁流体内部单位磁性颗粒团聚体所含磁性颗粒数量 $(\beta N_0)_s$ 在很大的范围内对其偏振光透过率没有影响.本文的结论能够为基于磁流体的一些新型光子器件的设计和制作提供有益的参考。

参考文献

- [1] SOCOLIUC V, POPESCU L B. The influence of long range interparticle correlations on the magnetically induced optical anisotropy in magnetic colloids[J]. *Physica A*, 2011, **390**(4): 569-578.
- [2] RAY R, ALIASKARISOHI S, FISCHER T M. Dynamics of self-assembly of flower-shaped magnetic colloidal clusters [J]. *Physical Review E*, 2010, **82**(3): 031406.
- [3] ELOI M T A, SANTOS J L, Jr MORAIS P C, *et al.* Field-induced columnar transition of biocompatible magnetic colloids: An aging study by magnetotransmissivity [J]. *Physical Review E*, 2010, **82**(2): 021407.
- [4] ZHANG T Z, LI J, MIAO H, *et al.* Enhancement of the field modulation of light transmission through films of binary ferrofluids[J]. *Physical Review E*, 2010, **82**(2): 021403.
- [5] CHATZIKYRIAKOS G, ILIOPOULOS K, BAKANDRITSOS A, *et al.* Nonlinear optical properties of aqueous dispersions of ferromagnetic $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles [J]. *Chemical Physics Letters*, 2010, **493**(4-6): 314-318.
- [6] GE J, YIN Y. Responsive photonic crystals[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, **50**(7): 1492-1522.
- [7] GE J, KWON S, YIN Y. Niche applications of magnetically responsive photonic structures [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, **20**(28): 5777-5784.
- [8] GAO Y, FAN C Z, HUANG J P. Photonic responses of colloidal ferrofluids[J]. *Progress in Physics*, 2010, **30**(4): 387-421.
- [9] PATEL R, MEHTA R V. Experimental investigations on magnetically induced photonic band gap in ferrodispersions[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2010, **52**(3): 30702.
- [10] WANG H, CHEN Q W, SUN Y B, *et al.* Synthesis of superparamagnetic colloidal nanochains as magnetic-responsive Bragg reflectors[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, **114**(46): 19660-19666.
- [11] KOSTOPOULOU A, TSIAOUSSIS I, LAPPAS A. Magnetic iron oxide nanoclusters with tunable optical response[J]. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 2011, **9**(2): 201-206.
- [12] HU T, ZHAO Y, LI X, *et al.* Novel optical fiber current sensor based on magnetic fluid[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(4): 392-394.
- [13] YUET K P, HWANG D K, HAGHGOOIE R, *et al.* Multifunctional superparamagnetic Janus particles [J]. *Langmuir*, 2010, **26**(6): 4281-4287.
- [14] PU S, CHEN X, CHEN Y, *et al.* Fiber-optic evanescent field modulator using a magnetic fluid as the cladding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **99**(9): 093516.
- [15] LI J, LIN Y, LIU X, *et al.* The modulation of coupling in the relaxation behavior of light transmitted through binary ferrofluids[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(6): 1182-1187.
- [16] PU S, DAI M, SUN G. Longitudinal field-induced polarized light transmittance of magnetic fluids [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(20): 4012-4016.
- [17] TAKETOMI S. Magnetic fluid's anomalous pseudo-Cotton Mouton effects about 10^7 times larger than that of nitrobenzene[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1983, **22**(7): 1137-1143.

Title Polarized Light Transmittance of Magnetic Fluids Assigned to the Coupling of Geometric Shadowing Effect and Faraday Rotation Effect

PU Sheng-li, JI Hong-zhu, YU Guo-jun, WANG Xiang

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

Abstract: The polarized light transmittance of magnetic fluids under longitudinal magnetic field and the influence of magnetic fluids concentration, dielectric constants of the remanent liquid phase within the magnetic fluids, the ratio of dipole moment to the thermal energy of single magnetic nanoparticle and the number of magnetic nanoparticles per agglomeration are investigated numerically according to the analytical expression when considering both the geometric shadowing effect and the Faraday rotation effect. Theoretical results indicate that the magnetic fluids concentration, dielectric constants of the remanent liquid phase within the magnetic fluids and the ratio of dipole moment to the thermal energy of the single magnetic nanoparticle affect the polarized light transmittance apparently. The polarized light transmittance of magnetic fluids increases linearly or oscillates with the strength of the longitudinal magnetic field for low or high concentration samples, respectively. In certain ranges, the polarized light transmittance of magnetic fluids increases with dielectric constants of the remanent liquid phase and the ratio of dipole moment to the thermal energy of single magnetic nanoparticle. While the polarized light transmittance is almost independent of the number of magnetic nanoparticles per agglomeration. The distinct difference of the parameter-dependent polarized light transmittance at low and high magnetic field regions is obtained. The applications to several photonic devices based on the polarized light transmittance of magnetic fluids under longitudinal magnetic field are proposed.

Key words: Magnetic fluid; Geometric shadowing effect; Faraday effect; Light transmittance; Photonic devices