

文章编号:1004-4213(2011)05-0652-6

非磁性微球掺杂对纳米磁流体场诱导双折射特性的影响

孙国庆,卜胜利,刘明,戴敏

(上海理工大学 理学院,上海 200093)

摘 要:利用二氧化硅和聚苯乙烯非磁性微球掺入铁氧体纯磁流体中,制得了复合磁流体.定性研究了复合磁流体在外磁场作用下的双折射与非磁性微球的种类、掺杂浓度以及纯磁流体自身浓度的关系.研究表明,不同浓度的纯磁流体掺杂等量的聚苯乙烯微球对其双折射随磁场的变化趋势影响不同;同一浓度的纯磁流体掺杂不同种类的非磁性微球,对其双折射的影响也不同;掺杂等量但不同比例两种非磁性混合微球所形成的复合磁流体中,其中一种非磁性微球对其双折射的影响起主导作用,使得该复合磁流体双折射随磁场的变化趋势与起主导作用的非磁性微球单独掺杂时相似.

关键词:复合磁流体;双折射;非磁性微球;磁空穴

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114005.0652

0 引言

自 20 世纪后期以来,磁流体作为一种新型功能材料受到了各方学者的广泛关注和研究.目前,磁流体在外磁场作用下的磁学和动力学特性的研究已非常深入^[1-6],并且已开发出商业化产品.随着磁流体研究的发展,磁流体在外磁场作用下的光学性质(如:磁致双折射效应、磁色效应、光透射特性、折射率可控性等^[7-13]),即磁光特性的研究逐渐发展成了一个重要的研究方向^[14-16].基于磁流体的磁光特性,人们已研制出多种磁流体光学原型器件,如:磁流体光纤传感器^[13, 17]、磁流体磁场传感器^[18-19]、磁流体光调制器、磁流体可调谐光强衰减器等.最近, Bubenhofer 等人指出基于磁开关胶体显示有可能作为液晶显示器的替代产品^[20].除此之外,二元、多元、离子或掺杂磁流体由于其独特的性质,近年来引起了相关领域研究者的关注^[21-24].

本文所讨论的复合磁流体是由纳米磁流体与微米量级的非磁性颗粒组成^[25-26].在外磁场作用下,该复合磁流体的性质不同于原有的磁流体.关于复合磁流体, Skjeltorp 于 20 世纪 80 年代研究了掺杂聚苯乙烯小球的 Fe_3O_4 复合磁流体的聚集行为^[27],并测量了其双折射和线性二向色性,他认为复合磁流

体中非磁性小球的不同排列影响了它的磁光特性^[28].此外,纯(未掺杂)磁流体掺杂非磁性微球后,非磁性微球在磁流体中会形成“磁空穴(Magnetic Hole)”,通过控制外磁场可控制“磁空穴”,从而可以辅助测量磁流体的流变、粘度及相变等特性^[29-30].但是,目前对复合磁流体磁光特性的研究尚不全面、系统、深入.例如,不同(非磁性微球)掺杂浓度对复合磁流体磁光特性的影响以及掺杂浓度与复合磁流体磁光特性强弱的关系等均未见报导.本文通过对不同浓度及同一浓度的纯磁流体分别掺杂非磁性微球(二氧化硅或聚苯乙烯微球)获得不同非磁掺杂的复合磁流体样品,定量地研究了非磁掺杂浓度与种类对复合磁流体双折射的影响.

1 复合磁流体制备与实验方法

1.1 复合磁流体样品的制备

为了获得不同浓度的磁流体,实验中选取 EXP08103 型油基氧化铁磁流体(其饱和磁化强度为 30 mT,常温粘度为 16 mPa·s)作为基础磁流体,用液体石蜡将其稀释成六种不同浓度的纯磁流体样品液,分别称作样液 $a(1:5.25)$ 、 $b(1:5.33)$ 、 $c(1:7)$ 、 $d(1:9)$ 、 $e(1:11)$ 和 $f(1:13)$ (其中小括号内的数字为量取的 EXP08103 磁流体的体积与液

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:孙国庆(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为复合磁流体的光学性质. Email: yiqingfan2006@163.com

导师(通讯作者):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:2010-11-25; **修回日期:**2011-01-15

体石蜡的体积比),所制得磁流体的磁性颗粒体积百分比浓度分别为 0.90%、0.89%、0.70%、0.56%、0.47%和 0.40%,如表 1。由表 1 可以看出,样液 *a-f*

中的纳米磁性颗粒浓度是逐渐降低的。在稀释过程中,将各样液超声约 2 h,以使磁性颗粒均匀分散于载液中,形成稳定的样液用于后续实验研究。

表 1 不同浓度的纯磁流体样液

Table 1 Samples of pure magnetic fluids with different concentrations

Sample	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Volume fraction of magnetic particle	0.90%	0.89%	0.70%	0.56%	0.47%	0.40%
(Volume ratio of EXP08103 magnetic fluid to liquid paraffin)	(1 : 5.25)	(1 : 5.33)	1 : 7	1 : 9	1 : 11	1 : 13

为了获得不同非磁微球掺杂浓度的复合磁流体,实验制备了不同系列的复合磁流体。首先量取相同体积的样液 *b*、*c*、*d*、*e*和 *f*,再称取 5 等份 1.167 mg 的聚苯乙烯微球(平均粒径为 3.13 μm,折光指数为 1.59,密度为 1.05 g/cm³)分别加入所取的样液中,然后采取超声分散的方法使其混合均匀,制得等量

聚苯乙烯掺杂不同浓度纯磁流体的复合磁流体。所制得复合磁流体的磁性颗粒体积百分比浓度分别为 0.89%、0.70%、0.56%、0.47%和 0.40%,聚苯乙烯的体积百分比浓度为 0.11%,分别称作复合磁流体样液 *b-PS*、*c-PS*、*d-PS*、*e-PS*和 *f-PS*,如表 2。

表 2 样液 *b-f* 掺杂等量聚苯乙烯微球制得的复合磁流体

Table 2 Composite magnetic fluids by doping samples *b-f* with equal polystyrene nonmagnetic microspheres

Sample	<i>b-PS</i>	<i>c-PS</i>	<i>d-PS</i>	<i>e-PS</i>	<i>f-PS</i>
Volume fraction of magnetic particle	0.89%	0.70%	0.56%	0.47%	0.40%
Volume fraction of nonmagnetic microsphere	0.11%	0.11%	0.11%	0.11%	0.11%

采用类似的方法,分别制备了 3 个不同系列的复合磁流体:

1) 取 5 份 1 mL 的样液 *a*,分别加入不等量的二氧化硅微球(平均粒径为 3 μm,折光指数为 1.46,密度约为 2.15 g/cm³),配制成非磁性微球(二氧化

硅)体积百分比浓度分别为 0.04%、0.07%、0.11%、0.15%和 0.19%,磁性颗粒体积百分比浓度约为 0.90%的复合磁流体,分别称作复合磁流体样液 *a-SiO₂(1)*、*a-SiO₂(2)*、*a-SiO₂(3)*、*a-SiO₂(4)*和 *a-SiO₂(5)*,如表 3。

表 3 样液 *a* 掺杂不等量二氧化硅微球制得的复合磁流体

Table 3 Composite magnetic fluids by doping sample *a* with different silicon dioxide nonmagnetic microspheres

Sample	<i>a-SiO₂(1)</i>	<i>a-SiO₂(2)</i>	<i>a-SiO₂(3)</i>	<i>a-SiO₂(4)</i>	<i>a-SiO₂(5)</i>
Volume fraction of magnetic particle	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%
Volume fraction of nonmagnetic microsphere	0.04%	0.07%	0.11%	0.15%	0.19%

2) 取 5 份 1 mL 的样液 *a*,分别加入不等量的聚苯乙烯微球,配制成非磁微球(聚苯乙烯)体积百分比浓度分别为 0.09%、0.17%、0.25%、0.34%和

0.42%,磁性颗粒体积百分比浓度约为 0.90%的复合磁流体,分别称作复合磁流体样液 *a-PS(1)*、*a-PS(2)*、*a-PS(3)*、*a-PS(4)*和 *a-PS(5)*,如表 4。

表 4 样液 *a* 掺杂不等量聚苯乙烯微球制得的复合磁流体

Table 4 Composite magnetic fluids by doping sample *a* with different polystyrene nonmagnetic microspheres

Sample	<i>a-PS(1)</i>	<i>a-PS(2)</i>	<i>a-PS(3)</i>	<i>a-PS(4)</i>	<i>a-PS(5)</i>
Volume fraction of magnetic particle	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%
Volume fraction of nonmagnetic microsphere	0.09%	0.17%	0.25%	0.34%	0.43%

3) 取 5 份 1 mL 样液 *a*,分别加入 2 mg 的二氧化硅和聚苯乙烯混合微球,其中二氧化硅和聚苯乙烯微球的质量比分别为 3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2 和 1 : 3,配制成非磁微球体积百分比浓度分别为

0.12%、0.13%、0.14%、0.16%和 0.17%,磁性颗粒体积百分比浓度为 0.90%的复合磁流体,分别称作复合磁流体样液 *a-Mix(1)*、*a-Mix(2)*、*a-Mix(3)*、*a-Mix(4)*和 *a-Mix(5)*,如表 5。

表 5 样液 *a* 同时掺杂二氧化硅和聚苯乙烯混合微球制得的复合磁流体

Table 5 Composite magnetic fluids by doping sample *a* with silicon dioxide and polystyrene nonmagnetic microspheres

Sample	<i>a-Mix(1)</i>	<i>a-Mix(2)</i>	<i>a-Mix(3)</i>	<i>a-Mix(4)</i>	<i>a-Mix(5)</i>
Volume fraction of magnetic particle	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%
Volume fraction of nonmagnetic microsphere	0.12%	0.13%	0.14%	0.16%	0.17%
Mass ratio of silicon dioxide to polystyrene	3 : 1	2 : 1	1 : 1	1 : 2	1 : 3
Volume ratio of silicon dioxide to polystyrene	1.465 : 1	0.977 : 1	0.488 : 1	0.244 : 1	0.163 : 1

最后将配制好的复合磁流体样液分别注入自制的样品盒(厚度约为 $150 \mu\text{m}$)内,密封标记用以实验测量。

1.2 实验方法

复合磁流体的双折射可采用偏振光学的方法进行测量,当入射光为线偏振光时,将其偏振方向调成与外磁场方向成 $\pi/4$,可获得最大的双折射测量灵敏度^[31]。另外,为了保证复合磁流体双折射测量的准确度,有必要考虑复合磁流体在外磁场诱导下产生的二向色性,此时复合磁流体的双折射 Δn 可表示为^[32]

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

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 为检偏器旋转一周的过程时,透过检偏器的最大和最小光强(如图 1); $h_i(H)$ ($i=1,2$) 分别为复合磁流体对 o 光和 e 光光量的吸收系数,可由 $I_i = I_{0i} e^{-2h_i(H)}$ 计算,其中 I_{0i} 分别为与入射线偏振光的偏振方向平行($i=1$)和垂直($i=2$)磁场方向时的入射光强, I_i 为通过样品后相应的透射光强; λ 为入射激光波长; d 为样品薄膜的厚度。在本文实验中, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $d = 150 \mu\text{m}$, 故只要测出 I_{\max} 、 I_{\min} 、 I_{0i} 和 I_i , 即可计算出复合磁流体的双折射。

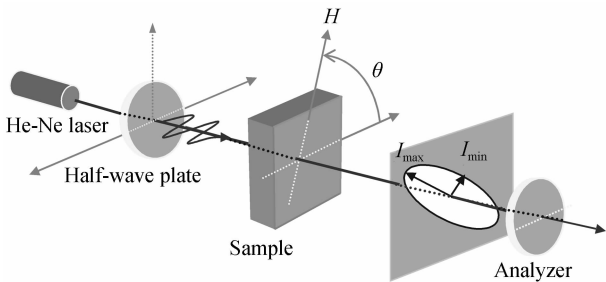


图 1 测量复合磁流体双折射的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for measuring the birefringence of the composite magnetic fluids

图 1 为测量复合磁流体双折射的实验装置图,实验中采用输出波长为 632.8 nm 的单模氦氖激光器,入射线偏振光的偏振方向通过半波片调成与外磁场方向成 $\pi/4$ 的角度。旋转检偏器,即可测量 I_{\max} 、 I_{\min} 。通过调节半波片,使入射线偏振光的偏振方向平行或垂直磁场方向,即可测量 I_{0i} 和 I_i 。改变磁场强度,即可测量不同磁场强度下的 I_{\max} 、 I_{\min} 和 I_i , 由此可以计算出不同磁场强度的复合磁流体的双折射。

2 实验结果与讨论

图 2 为样液 a-f 在外磁场作用下的双折射与磁感应强度的关系曲线。由图 2 可看出,在实验磁场强度范围内, c、d、e 和 f 样品的双折射均随外磁场强

度的增大而单调递增,但 a 和 b 样品的双折射初始随着外磁场强度的增加而变大,之后,随着外磁场强度的继续增大而逐渐减小。随着外磁场强度的逐渐增加,磁流体内部的磁性颗粒沿外磁场方向逐渐凝聚成磁链,致使磁流体内部结构呈现各向异性,当光线通过时出现光的各向异性,即发生双折射效应。由于样液 c、d、e 和 f 内部的磁性颗粒浓度是逐渐减小的,磁性颗粒间的平均距离逐渐增大,所以在相同磁场强度下,磁性颗粒间的相互作用力逐渐减弱,导致磁链数和磁链密度逐渐减小,进而使得其内部结构的各向异性逐渐变弱,双折射效应逐渐变弱,即其双折射逐渐变小。在磁感应强度 B 达到 28 mT 之前,样液 a 和 b 的双折射随 B 的变化趋势同样液 c、d、e 和 f。但是随着 B 的继续增大,样液 a 和 b 的双折射相继达到最大值,继而逐渐减小。对样液 a 和 b 来说,其内部磁性颗粒的浓度较样液 c、d、e 和 f 大得多,当 B 较大时,磁流体内部磁性颗粒间将发生较强的相互作用,很可能会破坏磁流体的分散稳定性,进而导致双折射减小。由于样液 a 中的磁性颗粒密度较样液 b 的大,在磁性颗粒间较强的相互作用下,在 B 继续增大后,致使样液 a 较样液 b 的双折射减小的快。

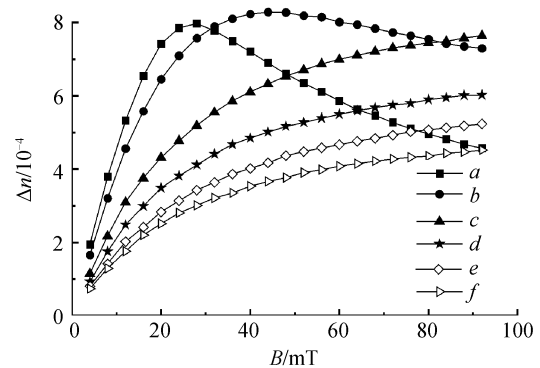


图 2 不同浓度纯磁流体的双折射与磁感应强度的关系

Fig. 2 Birefringence as a function of magnetic induction for pure magnetic fluids with different concentrations

当向样液 b、c、d、e 和 f 中掺入等量的聚苯乙烯微球,其双折射随磁感应强度的变化关系如图 3。由图 3 看出,非磁性微球掺杂引起的双折射变化存在三种情况:1)非磁性微球掺杂对样液 b 的双折射影响非常小;2)非磁性微球掺杂使得样液 c 的双折射减小;3)对于样液 d、e 和 f,非磁性微球掺杂使其双折射增大。由此看出,掺杂等量的聚苯乙烯微球对不同浓度纯磁流体双折射的影响不同。对于浓度较高的样液 b 来说,掺入的聚苯乙烯微球量较其内部磁性颗粒的量要小得多,致使复合磁流体 b-PS 的双折射与样液 b 的非常接近。而对于样液 c、d、e 和 f,掺入的聚苯乙烯微球量和磁性颗粒量可以比拟,在外

磁场的作用下,这些非磁性微球产生与外磁场方向相反的磁矩,即形成了“磁空穴”,它们沿着外磁场的方向排成有序的结构^[31],从而影响了原纯磁流体的结构,导致双折射发生改变.至于纯磁流体掺杂聚苯乙烯导致其双折射增大还是减小,本文认为可能与非磁性微球的相对掺杂量有关.

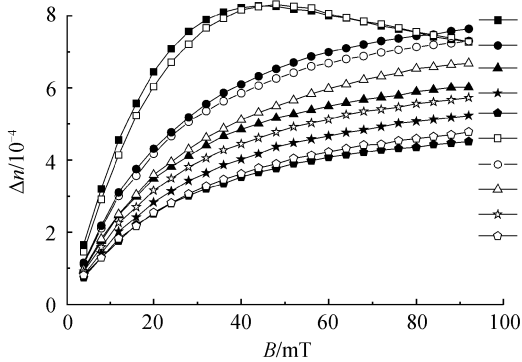


图 3 不同浓度纯磁流体及其相应的聚苯乙烯微球掺杂复合磁流体的双折射与磁感应强度的关系

Fig. 3 Birefringence as a function of magnetic induction for pure magnetic fluids with different concentrations and their corresponding polystyrene microspheres-doped composite magnetic fluids

为了进一步讨论复合磁流体的双折射特性,研究了同一浓度的纯磁流体掺杂不等量非磁性微球的情况.图 4 为样液 *a* 及其二氧化硅掺杂的复合磁流体 *a-SiO₂(1)*、*a-SiO₂(2)*、*a-SiO₂(3)*、*a-SiO₂(4)* 和 *a-SiO₂(5)* 的双折射与磁感应强度的关系.由图 4 可看出,此系列复合磁流体的双折射随磁感应强度的变化趋势与原纯磁流体有很大的区别.原纯磁流体的双折射随磁感应强度是非单调的变化关系,而相应掺杂磁流体的双折射随磁感应强度是单调递增的.在相同磁感应强度下,掺杂非磁性微球量的多少对复合磁流体双折射的影响不大,特别是低磁场区域.

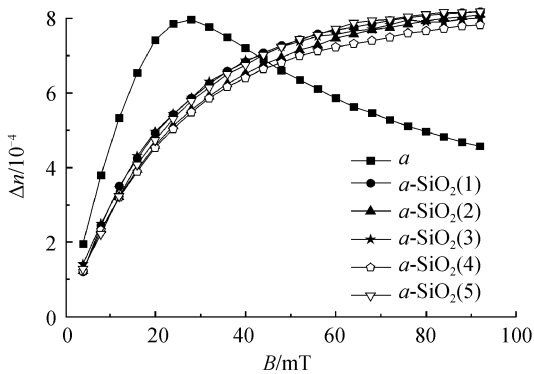


图 4 样液 *a* 及其复合磁流体的双折射与磁感应强度的关系
Fig. 4 Birefringence as a function of magnetic induction for Sample *a* with *a-SiO₂*

图 5 是样液 *a* 掺杂不等量聚苯乙烯微球所形成的复合磁流体 *a-PS(1)*、*a-PS(2)*、*a-PS(3)*、*a-PS(4)* 和 *a-PS(5)* 的双折射值与磁感应强度的关系.由图 5

可以看出,与掺杂二氧化硅微球不同,该系列复合磁流体双折射随磁感应强度的变化趋势与原纯磁流体样液 *a* 基本相似,随着磁感应强度的增加,双折射先增加后减小,呈现非单调变化的特性,且双折射增大速率快的样液,其减小的速率也快.

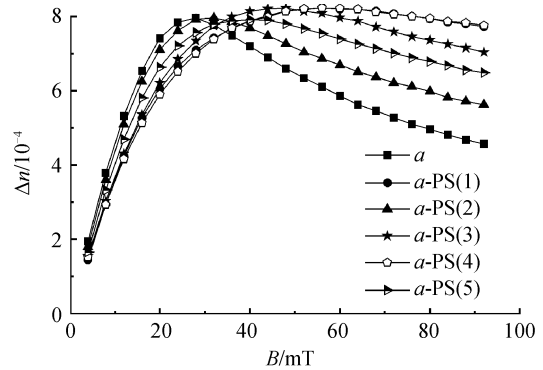


图 5 样液 *a* 及其复合磁流体 *a-PS* 的双折射与磁感应强度的关系

Fig. 5 Birefringence as a function of magnetic induction for Sample *a* with *a-PS*

由图 5 还可看出,复合磁流体 *a-PS(1)*、*a-PS(2)*、*a-PS(3)*、*a-PS(4)* 和 *a-PS(5)* 的双折射达到最大值所对应的磁感应强度较纯磁流体样液 *a* 要大,但双折射的最大值基本相同.由此可见,掺杂非磁性微球聚苯乙烯所形成的复合磁流体,在非磁性微球所形成的“磁空穴”的影响之下,会使其达到饱和和双折射所需的磁场强度增大.因此,基于此种复合磁流体的光学器件,其所适用的磁场范围便可得以扩展.比较图 4 和 5 可看出,相同的纯磁流体样液,掺杂不同种类的非磁性微球,其相应复合磁流体的双折射随磁场的变化趋势不同.由此可见,非磁性微球的种类,会对基于该种非磁性微球的复合磁流体的双折射在外磁场环境下的变化产生显著的影响.

图 6 为样液 *a* 掺杂等量但不同比例的二氧化硅和聚苯乙烯混合微球形成的复合磁流体 *a-Mix(1)*、*a-Mix(2)*、*a-Mix(3)*、*a-Mix(4)* 和 *a-Mix(5)* 的双折

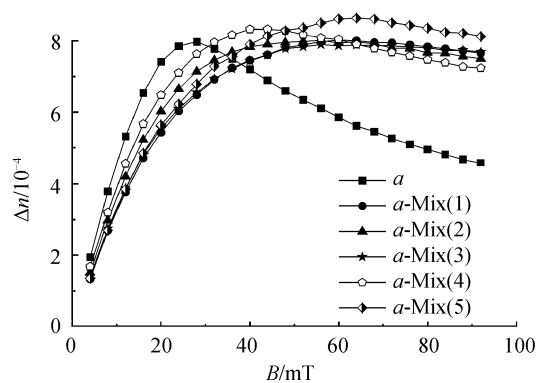


图 6 样液 *a* 及其复合磁流体 *a-Mix* 的双折射与磁感应强度的关系

Fig. 6 Birefringence as a function of magnetic induction for Sample *a* with *a-Mix*

射与磁感应强度的关系.由图6可以看出,复合磁流体 a -Mix(1)、 a -Mix(2)、 a -Mix(3)、 a -Mix(4)和 a -Mix(5)的双折射随磁感应强度的变化趋势与图5中单独掺杂聚苯乙烯的复合磁流体的非单调变化趋势相类似,但明显不同于图4中单独掺杂二氧化硅的复合磁流体单调变化趋势的双折射.由此可见,虽然样液 a 中同时掺杂二氧化硅和聚苯乙烯两种微球,但聚苯乙烯微球对整个复合磁流体的影响起主导作用.

3 结论

实验定性地研究与分析了掺杂非磁性微球的种类与掺杂浓度对复合磁流体双折射特性的影响.结果表明,利用聚苯乙烯微球掺杂不同浓度的纯磁流体,所得复合磁流体的双折射与纯磁流体的浓度有很大的关系;通过向同一浓度的纯磁流体中掺杂不等量的二氧化硅、聚苯乙烯微球,可以有效地改变磁流体双折射随外磁场的变化趋势,且聚苯乙烯掺杂基本不改变原纯磁流体双折射的最大值;通过掺杂两种非磁性混合微球,其中某一非磁性微球会对复合磁流体的双折射影响起主导作用,使得其双折射随外磁场的变化趋势与起主导作用的非磁性微球单独掺杂的情况较为类似.

参考文献

- [1] BUTTER K, BOMANS P H H, FERDERIK P M, *et al.* Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy[J]. *Nat Mater*, 2003, **2**(2): 88-91.
- [2] SAFRANS A. Ferrofluids; Magnetic strings and networks [J]. *Nat Mater*, 2003, **2**(2): 71-72.
- [3] BRAITHWAITE D, BEAU G E, TOURNIER R. Magnetically controlled convection in a paramagnetic fluid[J]. *Nature*, 1991, **354**(6349): 134-136.
- [4] ODENBACH S, LIU M. Invalidation of Kelvin force in ferrofluids[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(2): 328-331.
- [5] LIU J, LAWRENCE E M, WU A. Field-induced structures in ferrofluid emulsions[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **74**(14): 2828-2831.
- [6] WIRTZ D, FERMIGIER M. One-dimensional patterns and wavelength selection in magnetic fluids[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, **72**(14): 2294-2297.
- [7] SCHOLTEN P C. Magnetic measurements on particles in suspension[J]. *IEEE Trans Magn*, 1975, **11**(3): 1400-1407.
- [8] YUSUF N A, QASMIEH I, ABU-SAFIA H. On the concentration and wavelength dependence of the degree of polarization in magnetic fluids [J]. *J Magn Magn Mater*, 1997, **166**(3): 374-380.
- [9] SOCOLIUC V, RASA M, SOFONEA V, *et al.* Agglomerate formation in moderately concentrated ferrofluids from static magneto-optical measurements [J]. *J Magn Magn Mater*, 1999, **191**(1-2): 241-248.
- [10] YUSUF N A, MANASRAH D A, ABDALLAH M A, *et al.* The temperature dependence of the optical anisotropy in magnetic fluids; birefringence and dichroism [J]. *J Magn Magn Mater*, 1994, **138**(1-2): 173-188.
- [11] LLEWELLYN J P. Form birefringence in ferrofluids[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1983, **16**(2): 95-104.
- [12] PU Sheng-li, LIU Ming, SUN Guo-qing. 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): 3265-3268.
- [13] 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-Electron Eng*, 2009, **36**(7): 126-131.
赵勇,董俊良,陈菁菁,等.磁流体的光学性质及其在光电传感领域中的应用[J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 126-131.
- [14] LIN Man-qian. Magneto-optical effect of magnetic fluids[D]. Tai Wan: Zhongshan University, 2001.
林曼倩.磁流体的磁光效应[D].台湾:中山大学,2001.
- [15] LI He-shan. Study for polarized light properties of magnetic fluids under external magnetic field [D]. Tai Wan: Zhongshan University, 2003.
李和山.磁流体在外加磁场下之偏振光特性研究[D].台湾:中山大学,2003.
- [16] LIU Ming, PU Sheng-li, SUN Guo-qing, *et al.* Magnetic-field-induced diffraction properties of light by water-based magnetic liquids[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3265-3268.
刘明,卜胜利,孙国庆,等.水基磁性液体的场诱导光衍射特性的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3265-3268.
- [17] HU Tao, ZHAO Yong, LÜ Zhi-wei, *et al.* Fiber optic electromagnetic sensor based on magnetic fluid [J]. *Opt Precis Eng*, 2009, **17**(10): 2445-2449.
胡涛,赵勇,吕志伟,等.光纤磁流体 F-P 电磁场传感器[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10): 2445-2449.
- [18] MARTINEZ L, RAKOWSKI R, CECELJA F. Design of a magneto-optical residual current device using aqueous ferrofluid as the sensing material[C]. Italy: IEEE, 2004.
- [19] MARTINEZ L, CECELJA F, RAKOWSKI R. A novel magneto-optical ferrofluid material for sensor applications [J]. *Sens Actuators A*, 2005, **123-124**(23): 438.
- [20] BUBENHOFER S B, ATHANASSIOU E K, GRASS R N, *et al.* Magnetic switching of optical reflectivity in nanomagnet/micromirror suspensions: colloid displays as a potential alternative to liquid crystal displays [J]. *Nanotechnol*, 2009, **20**(48): 485302.
- [21] 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.
- [22] LI J, QIU Y Q, LIN Y Q, *et al.* A study of modified Fe₃O₄ nanoparticles for the synthesis of ionic ferrofluids [J]. *Applied Surface Science*, 2010, **256**(23): 6977-6981.
- [23] LIN Y Q, LI J, LIU X D, *et al.* Saturation magnetization and law of approach to saturation for self-formed ionic ferrofluids based on MnFe₂O₄ nanoparticles [J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2010, **23**(3): 325-330.
- [24] HAN SH N, LI J, GAO R L, *et al.* The modification effect in magnetization behaviors for CoFe₂O₄ - p-NiFe₂O₄ binary ferrofluids[J]. *Appl Phys A*, 2010, **98**(1): 179-186.
- [25] DAVIES P, POPPLEWELL J, MARTIN G, *et al.* Monte Carlo simulations of the structure of magnetic fluid composites[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1986, **19**(3): 469-476.
- [26] SLJETORP A T. Monodisperse particles and ferrofluids; A

- fruit - fly model system[J]. *J Magn Magn Mater*, 1987, **65** (2-3): 195-203.
- [27] SKJELTORP A T. One- and two-dimensional crystallization of magnetic holes[J]. *Phys Rev Lett*, 1983, **51**(25): 2306.
- [28] XU Ming-xiang. Magneto-optical effect in the composite magnetic fluids[J]. *J Infrared Millimeter Waves*, 1999, **18** (3): 353-356.
徐明祥. 磁性流体复合体的磁光效应. 红外与毫米波学报 [J]. 1999, **18**(3): 353-356.
- [29] ISLAM M F, LIN K H, LACOSTE D, *et al.* Field-induced structure in miscible ferrofluid suspensions with and without latex spheres[J]. *Phys Rev E*, 2003, **67**(2): 021402.
- [30] SVASAND E, SKJELTORP A T, AKSELVOLL J, *et al.* Local viscosity measurements using oscillating magnetic holes [J]. *J Appl Phys*, 2007, **101**(5): 054910.
- [31] PU S L, DAI M, SUN G Q. Linear birefringence and linear dichroism coupled optical anisotropy of magnetic fluids by external magnetic fields[C]. Wuhan: IEEE, 2009.
- [32] HE Wei. The study of magneto-optical property and optical bistable device of magnetic fluids [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1987.
何卫. 磁性流体的磁光特性及磁流体光学双稳态器件的研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 1987.

Influence of Nonmagnetic Microsphere Doping on Magnetic-field-induced Birefringence of Nanostructured Magnetic Fluids

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

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

Abstract: Composite magnetic fluids were obtained by doping silicon dioxide and polystyrene nonmagnetic microspheres into the pure ferrite magnetic fluids. The relationship between the magnetic-field-induced birefringence of composite magnetic fluids and the species, concentrations of nonmagnetic microspheres and pure ferrite magnetic fluids were investigated qualitatively. The results indicate that pure magnetic fluids with different concentrations doped with equal quantity of polystyrene microspheres have different variation trends for the birefringence with respect to the externally magnetic field. Different kinds of nonmagnetic microspheres have different influences on the change of birefringence after doping into the same pure magnetic fluids. When doping with two-kind-mixed nonmagnetic microspheres (equal quantity but different proportion between the two kinds of microspheres), one kind of the nonmagnetic microspheres will play a leading role in the variation of birefringence with externally magnetic field. Then, the variation trend of the birefringence with externally magnetic field for the as-prepared composite magnetic fluids is similar to that only doped with the leading nonmagnetic microspheres.

Key words: Composite magnetic fluid; Birefringence; Nonmagnetic microsphere; Magnetic hole