

水基磁性液体的场诱导光衍射特性的研究*

刘明, 卜胜利[†], 孙国庆, 戴敏, 顾铮先

(上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘 要:设计了一套用于研究磁性液体的场诱导静态和动态光衍射特性的实验装置. 通过在样品的后方放置一个适当孔径的光阑, 实现了定量研究其衍射特性的目的. 采用沿衍射方向移动光阑的方法定量地研究了衍射光的空间分布. 设计了一个指数衰减函数用来拟合动态衍射实验的数据, 获得动态衍射的特征时间. 以两种不同浓度的表面包覆型水基氧化铁磁性液体样品为例, 定量地实验研究了其场诱导光衍射特性与外磁场强度和样品浓度的关系. 结果表明, 磁性液体的场诱导结构对光的静态和动态衍射与外磁场的强度和磁性液体的浓度有关. 其静态衍射与外磁场强度呈非单调的关系; 其动态衍射的特征时间与外磁场的强度成反比, 与磁性液体的浓度成正比. 对实验中观察到的场诱导静态和动态衍射特性的物理机理进行了详细的分析.

关键词:磁性液体; 磁场; 衍射; 特征时间

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3264-5

0 引言

表面包覆型磁性液体是一种表面包覆一层活性剂的纳米级铁磁性颗粒分散在适当液态载液中所形成的稳定的胶体溶液. 在表面活性剂的位阻和布朗热运动的共同作用下, 磁性液体内部的磁性颗粒能够克服其自身重力引起的沉降以及削弱颗粒间静电、磁的相互作用而引起的凝聚, 从而能够长时间的稳定分散、不产生沉淀和凝聚^[1]. 自从稳定的磁性液体被成功合成以来, 其磁学、流体动力学特性已受到了相关领域学者的广泛重视. 至于磁性液体的光学性质, 最显著的是其磁光效应^[2-6]. 其中研究比较多的是它的光学各向异性. 纵观磁性液体的各种光学性质, 其最大的优点是其可调谐特性, 这种性质在可调谐光学器件上是非常有益的.

在外加磁场的作用下, 磁性液体内部的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性液体变成各向异性的结构. 这种各向异性的结构可以是周期性的、近周期性的或非周期性的, 主要取决于磁性液体的类型及性能参数^[7-9]. 其横向(垂直于磁场方向)尺寸以及它们之间的间距通常在微米量级^[7-9], 与光的波长可以比拟, 故这种场诱导结构将会对入射光具有衍射效应. 虽然人们对各种材料的衍射效应进行了较多的研究^[10-11], 但是对磁性液体的场诱导衍射效应的研究

报道较少. 本文以表面包覆型水基氧化铁磁性液体为例, 实验观察了入射激光经过样品后的衍射现象, 并对实验中观察到的场诱导衍射特性的物理机理进行了详细的分析. 实验中的磁性液体薄膜样品置于场强可调的磁场中, 入射激光束垂直于样品的表面, 且与磁场的方向垂直.

1 实验装置与实验方法

为了实验研究磁性液体中的场诱导各向异性结构对入射光的衍射效应, 本文设计了一套用于研究磁性液体的场诱导光衍射特性的实验装置, 如图 1. 入射激光为氦氖激光器产生的激光, 其输出波长为 632.8 nm. 磁性液体薄膜放在电磁铁的两极中间(两极之间的距离约为 85 mm), 电磁铁产生的磁场平行于磁性液体薄膜的表面, 且与入射光的传播方向垂直. 磁场的强度可通过调节电磁铁的供电电流大小来改变. 为了定量地研究磁性液体的场诱导衍射特性, 在磁性液体薄膜的后方放置一个小孔光阑, 小孔光阑的中心在入射激光束的光轴上, 小孔直径等于入射激光束的直径(为 2 mm). 这样, 衍射光由

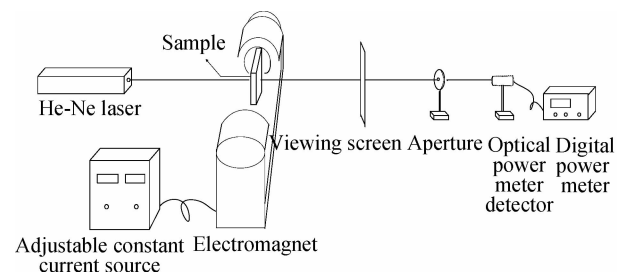


图 1 研究磁性液体的场诱导衍射特性的实验装置
Fig. 1 Experimental setup for studying the magnetic-field-induced diffraction properties of the magnetic liquids

* 国家自然科学基金(10704048)和上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金资助

[†] Tel: 021-55274932

Email: shlpu@usst.edu.cn

收稿日期: 2009-04-20

修回日期: 2009-06-25

于偏离原来的传播方向,均被光阑挡住.衍射越强,被光阑挡住的光功率就越大,通过光阑的光功率就越小,据此可以通过测量透过光阑的光功率来定量地研究衍射的程度.在不同磁场强度时,分别测量透过光阑的光功率,即可定量地研究外磁场强度对磁性液体衍射特性的影响.另外,为了研究衍射光的空间分布,可将小孔光阑沿着衍射方向扫描,逐点记录透过光阑的光功率,即可描绘出衍射光的空间分布情况.为了观察入射光经过样品后的衍射图样,可用一个观察屏取代小孔光阑,投射到观察屏上的衍射图样用 CCD 数码相机拍摄记录,用于分析讨论.

实验中所用的磁性液体是水基氧化铁磁性液体,其密度为 1.20 g/ml.为了比较研究不同浓度的磁流体的衍射特性,利用去离子水将其稀释成磁性颗粒质量百分比浓度分别为:2.032%和 2.423%的实验样品,分别称作样品 A 和样品 B.在室温下,分别研究了这两种样品的场诱导静态和动态衍射特性.

2 实验结果与讨论

加上磁场后,磁性液体内部的磁性颗粒团聚成相对稳定的结构需要一定的时间,故衍射光及衍射图样需要同样的时间才能达到稳定的状态.对于静态衍射特性的研究,每改变一次磁场强度,均需等待片刻(约 50 s),再测量透过小孔光阑的光功率,并拍摄下相应的衍射图样.图 2 为样品 A 和样品 B 的衍

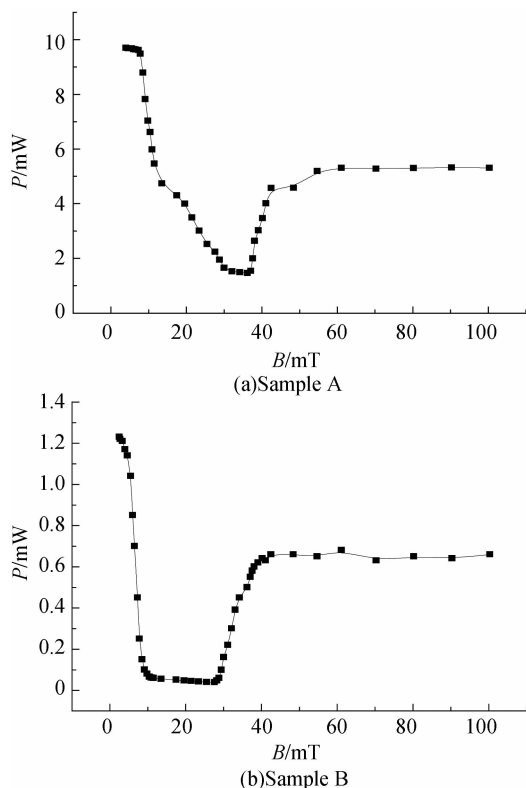


图 2 样品 A 和 B 的稳态透射光功率与外磁场强度的关系
Fig. 2 Stable power of the transmitted light after the iris as a function of magnetic field strength for Sample A and B

射光通过小孔光阑的稳态功率 P 与外加磁场强度 B 的关系.由图 2 可看出:稳态透射光功率与外磁场强度之间是非单调的关系,即当磁场强度比较小时,稳态透射光功率随外磁场强度的增加而减小,但在高磁场强度时,稳态透射光功率随外磁场强度的增加而增大,直至趋向于饱和,稳定在一个固定不变的数值.在某个适中强度的磁场时,稳态透射光功率达到极小值.

在未外加磁场时,磁性颗粒借由表面活性剂及布朗运动的作用,均匀分散于载液中,没有衍射现象发生,透过小孔光阑的光功率基本为样品的透射光功率,其值最大.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.该磁链的横向尺寸及其相互间的距离通常在微米量级,和入射光波长可以比拟,构成了衍射单元,对入射激光束具有衍射效应,故透射光阑的光功率将减弱.随着磁场的增强,这种衍射单元(磁链)的数量增多,而其尺寸及相互间的距离变小,进而对入射光具有更强的衍射作用,故通过光阑的透射光将进一步减弱.当磁场强度加到某一值时,磁链完全形成,衍射效应最强,光阑的透射光功率最小.继续增加磁场强度时,磁链之间的相互排斥力将增强,导致磁链间的距离将增大^[12-13],衍射效应变弱,进而透过光阑的透射光功率反而增加,最后达到一稳定状态,透射光功率保持恒定.这与图 2 的实验测量结果较吻合.另外,在相同体积的磁性液体中,样品 A 比样品 B 含有的磁性颗粒少,故样品 A 在同样磁场强度下形成的磁链数量也比样品 B 少.因此,在整个磁场强度范围内,样品 A 的衍射光通过小孔光阑的稳态光功率均比样品 B 的要高.

图 3 和图 4 是样品 A 和样品 B,在不同外加磁场强度下(4, 7.3, 36.2 和 80 mT),用 CCD 数码相机记录的通过磁性液体薄膜的光衍射图样.由图可看出,衍射图样由一个点开始,随着磁场的加强,图样开始向四周衍伸,呈现向上下方向延伸的明显趋势,并且随着磁场的加强,图样逐渐成为明亮的实线,最后稳定为亮实线.衍射图样的中央亮斑随着磁场的加强,变得越来越不明显,最后融合成条状衍射图样.这种逐渐加强的条状衍射图样主要是由于磁性液体中的磁性颗粒在外磁场的作用下团聚成沿磁场方向的链状结构,并且外磁场的强度越强,这种链状结构的横向尺寸及间距就越小^[14],故衍射效应随着磁场的增大而加强,观察到的条状衍射条纹就越来越亮.随着磁场的增大,衍射效应越来越明显,衍射光强增大,而中央亮斑的强度随着衍射的加强就

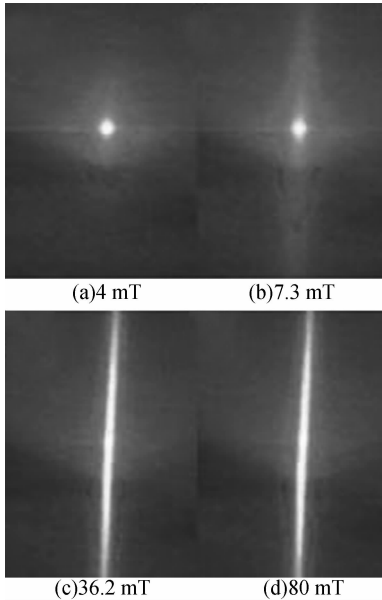


图3 样品 A 在不同外加磁场强度下对入射光的衍射图样
Fig. 3 Diffraction patterns for Sample A at different strengths of magnetic field

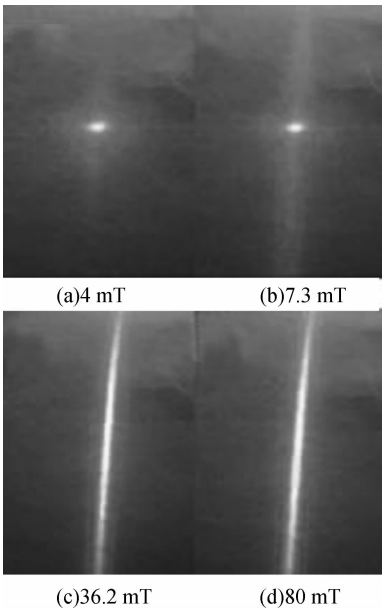


图4 样品 B 在不同外加磁场强度下对入射光的衍射图样
Fig. 4 Diffraction patterns for Sample B at different strengths of magnetic field

变得越来越弱,最后导致中央亮斑和衍射条纹融为一体.另外,加磁场后出现的衍射光成线状图样,而不是周期性光栅的多级衍射点状图样,因为这里的链状结构不是严格的周期性结构^[15].

未加磁场或磁场强度非常低(如电磁铁的剩磁强度)时,磁性颗粒均匀分散于液态载液中,没有衍射效应,只能观察到如图 3(a)和 4(a)的散射样光斑,中心光斑较明亮,四周光晕较为规则,则透过光阑的光功率基本等于样品的透射光功率.当加上适当强度的磁场后,开始形成磁链,衍射效应开始发生,可观察到如图 3(b)和 4(b)的衍射图样,中心光斑比图 3(a)和 4(a)略暗,四周光晕向竖直方向延伸

的趋势加强,水平方向的光晕变窄,这说明入射激光被沿竖直方向衍射,作为衍射结构单元的磁链的长度方向沿着水平方向,这与实验中外加磁场的方向是一致的.这种情况下,透过光阑的光功率由于衍射效应而小于样品的透射光功率.当外加磁场进一步增加时,由于磁链结构的进一步演化,衍射效应逐步加强,可观察到如图 3(c)和 4(c)的增强衍射图样,即明亮的条状衍射光斑,中心亮斑已经消失,这是由于原来中心亮斑处的激光能量大部分被衍射到竖直方向,最终导致透过光阑的光功率进一步减弱.当外加磁场足够大时,磁性液体内部的磁链形成基本趋于稳定,衍射光图样亦趋于稳态,如图 3(d)和 4(d).

比较图 3 和 4 还可以发现,在相同强度的磁场下,样品 B 的衍射光斑的亮度要比样品 A 的弱,这是由于样品 B 的浓度比样品 A 高,对光的吸收相对较大造成的.由 Yang 等人对磁性液体场诱导结构形成的实验结果可知^[7,14],磁性流体的浓度愈高,单位体积内形成的磁链的数目就愈多且磁链愈细,磁链之间的间距就愈小,对光的衍射效应将愈强.所以在相同强度的磁场下,高浓度的磁性流体对入射光的衍射作用要比低浓度的明显.

为了定量地得出衍射光的空间分布,我们采用沿着衍射条纹方向移动小孔光阑的方法,测量了不同磁场强度下的衍射光的空间分布.由于不同浓度的样品,在相同的磁场强度下其衍射光的空间分布基本类似,这里仅以样品 A 为例进行了衍射光的空间分布测量,如图 5(图中纵坐标为归一化功率),图中横坐标表示光阑中心偏离入射激光轴线的距离.由图 5 可以看出,在磁场强度较小时(例如:4 和 7.3 mT),透过磁性液体的光功率主要集中在光轴附近,基本没有发生衍射;而当外加磁场强度稍强时(例如:36.2 mT 和 80 mT),光轴附近的光功率减小,偏移光轴位置的光功率增大,这说明有衍射效应发生.这与图 3 的结果相一致.由图 5 可见衍射光功

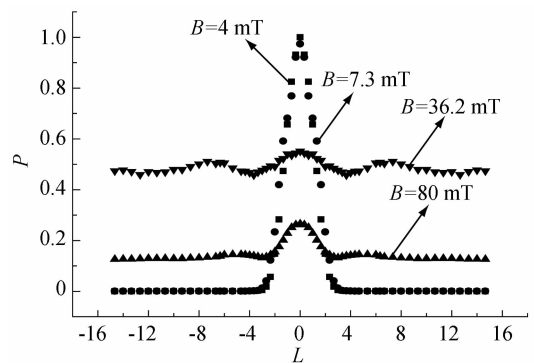


图5 不同外加磁场强度下衍射光的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of diffractive light under different external magnetic field strength

率的空间变换比较平缓,未见明显的类似周期性光栅的多级衍射强度分布图样,这与前文的分析较吻合。

由于磁性颗粒的团聚需要一个过程,当加上某个强度的磁场后,其内部结构达到稳态需要一定的时间,在此期间磁性液体对光的衍射效应也是动态的^[16]。为了研究这种动态的衍射效应,在某一固定磁场强度下,记录了透过光阑的光功率随时间的变化关系。根据实验记录数据的变化趋势,本文设计了一个指数衰减函数 $P = P_f + P_a e^{-t/\tau}$ 用来拟合实验数据,定量地得出这个动态变化过程快慢程度。其中: P 为透过光阑的光功率, t 为时间, P_f , P_a , τ 为拟合常数。为反应指数函数衰减快慢程度的特征时间,即可表示该动态过程的变换快慢程度。图 6 和图 7 给出了样品 A 和样品 B 在五种不同磁场强度下(7.8, 8.5, 9.1, 10.0 和 10.9 mT)的动态衍射特性的实验数据及拟合情况。

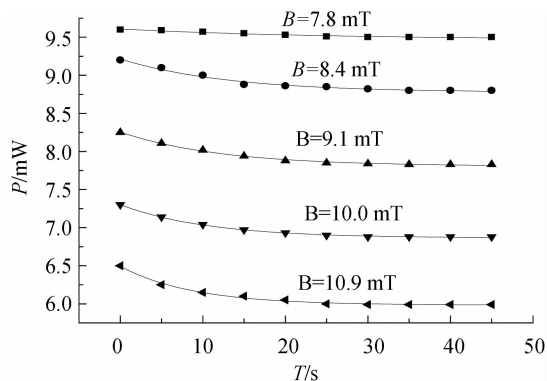


图 6 样品 A 在不同磁场强度下的动态衍射特性
Fig. 6 Dynamic diffraction properties for Sample A at three different strengths of magnetic field

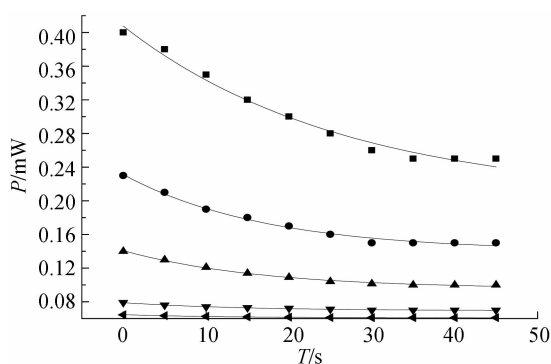


图 7 样品 B 在不同磁场强度下的动态衍射特性
Fig. 7 Dynamic diffraction properties for Sample B at three different strengths of magnetic field

由图 6 和 7 的拟合结果得出,样品 A 在 7.8, 8.5, 9.1, 10.0 和 10.9 mT 磁场强度下的动态衍射特征时间分别为:24.726, 13.075, 12.209, 10.549 和 8.870 s,而样品 B 在相同磁场强度下的动态衍射特征时间分别为:26.586, 17.031, 16.431, 14.694 和 13.497 s。由此可看出,磁性液体的场诱导动态衍射过程的快慢不仅与外磁场的强度有关,而且与样

品的浓度有关。图 8 重新画出了样品 A 和样品 B 的衰减特征时间与外磁场强度的关系,用于比较分析。由图 8 可看出,动态衍射的衰减特征时间随外磁感应强度的增强而减小,这是由于外磁场强度越大,磁性颗粒间的磁偶相互作用就越强,更有利于磁性颗粒快速成链达到稳态。由图 8 还可以看出,动态衍射的衰减特征时间还与磁性液体的浓度有关。在相同强度的磁场作用下,磁性液体的浓度越大,其动态衰减特征时间就大。这可能是由于低浓度磁性液体的成链数目少,磁链在形成过程中(沿外磁场方向排列时)受到阻碍、碰撞等作用的概率要小于高浓度磁性液体的样品,故有利于终态磁链的快速稳定形成,进而动态衍射过程的特征时间相对较短。

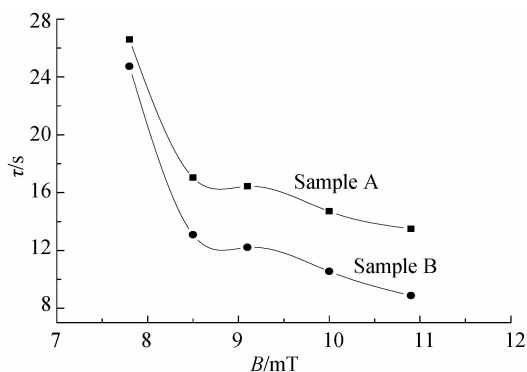


图 8 不同浓度磁性液体的动态衍射特征时间与外磁感应强度的关系

Fig. 8 Characteristic time of dynamic diffraction of magnetic liquids as a function of magnetic field strength for two samples with different concentrations

3 结论

在不同强度的外磁场作用下,通过测量透过小孔光阑的光功率以及拍摄样品后的光衍射图样,系统地研究了纳米磁性液体的静态和动态光衍射与磁场强度和磁性液体浓度的关系。实验结果表明,磁性液体的场诱导结构对光的静态和动态衍射不仅与外磁场的强度有关,还与磁性液体的浓度有关。其动态衍射的特征时间与外磁场的强度成反比,与磁性液体的浓度成正比。另外,磁性液体对光的衍射主要是由于其内磁性颗粒团聚成链造成,故可通过研究磁性液体的光衍射特性而间接地研究其场诱导团聚的微观过程。这为磁性液体的微观物理过程的研究提供一种新的方法和手段。

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]. *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_3O_4 nanoparticles[J]. *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] YANG S Y, HORNG H E, HONG C-Y, *et al.* Control method for the tunable ordered structures in magnetic fluid microstrips [J]. *J Appl Phys*, 2003, **93**(6):3457-3460.
- [8] HONG C-Y, HORNG H E, KUO F C, YANG S Y, *et al.* Evidence of multiple states of ordered structures and a phase transition in magnetic fluid films under perpendicular magnetic fields[J]. *J Appl Phys*, 1999, **75**(15):2196-2198.
- [9] HONG C-Y, JANG I J, HORNG H E, *et al.* Ordered structures in Fe_3O_4 kerosene-based ferrofluids[J]. *J Appl Phys*, 1997, **81**(8):4275-4277.
- [10] GAN Xin-shi, YANG Jia-min, YI Rong-qing, *et al.* Experimental research on integral diffraction coefficient of RAP crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4):947-949.
- 甘新式, 杨家敏, 易荣清, 等. RAP 晶体积分衍射效率的实验研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(4):947-949.
- [11] XIE Jun, ZHAO FU-hua, WEI Wei, *et al.* Fabrication of diffractive grating using $\text{HfO}_2\text{-SiO}_2$ Sol-Gel film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):133-134.
- 谢军, 赵福华, 魏伟, 等. 采用 $\text{HfO}_2\text{-SiO}_2$ 溶胶-凝胶薄膜制备衍射光栅[J]. 光子学报, 2008, **37**(1):133-134.
- [12] LI J, LIU X, LIN Y, *et al.* Field-induced transmission of light in ionic ferrofluids of tunable viscosity[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2004, **37**:3357-3360.
- [13] LI J, LIU X, LIN Y, *et al.* Field modulation of light transmission through ferrofluid film [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **91**(25):253108.
- [14] YANG S Y, CHAO Y H, HORNG H E, *et al.* Tunable one-dimensional ordered structure in a magnetic fluid microstrip under parallel magnetic fields[J]. *J Appl Phys*, 2005, **97**(9):093907.
- [15] FANG W-X, HE Z-H, XU X-Q, *et al.* Aligned structures of Fe_3O_4 nanoparticles in a curable polymer carrier induced by a magnetic field[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(9):2386-2389.
- [16] RABLAU C, VAISHNAVA P, SUDAKAR C, *et al.* Nanoparticle aggregation and relaxation effects in ferrofluids studied through anisotropic light scattering[C]. *SPIE*, 2008, **7032**:70320Z.

Magnetic-field-induced Diffraction Properties of Light by Water-based Magnetic Liquids

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

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

Abstract: An experimental setup is designed to investigate the field-induced static and dynamic diffraction properties. The corresponding diffraction properties are investigated quantitatively by putting a diaphragm with an appropriate aperture behind the sample. By moving aperture along diffraction to study quantitatively the spatial distribution of light diffraction. An exponentially decaying function is applied to fit the experimental data of the dynamic diffraction, and the corresponding characteristic time is obtained. The dependence of the field-induced diffraction properties on the magnetic field strength and the sample concentration is investigated. The static and dynamic light diffraction of the field induced magnetic liquid structure depends on magnetic field intensity and the concentration of magnetic fluid. The relationship between diffraction and external static magnetic field strength is non-monotonic. The dynamic diffraction's characteristic time is inversely proportional to the intensity of external magnetic field and directly proportional to the concentration of magnetic fluid.

Key words: Magnetic liquid; Magnetic field; Diffraction; Characteristic time



LIU Ming was born in 1984. Now he is a graduate student at College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, and his research interests focus on the optical properties of nanostructured magnetic materials.