

磁性液体薄片磁控光开关效应研究

白浪¹, 于娟²

(1. 攀枝花学院材料工程学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 攀枝花学院电气信息工程学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要:研究了在平行于激光照射方向递增的梯度磁场作用下的磁性液体薄片光透射率随时间的变化情况。结果表明在磁场作用下磁性液体内部形成微粒链结构, 微粒链受到梯度磁场汇聚力, 向薄片中心聚集, 在此处形成光关闭现象。通过改变磁性液体体积分数、外磁场变化率、初始磁场大小可以达到控制调节磁性液体的响应时间和光关闭时间的效果, 为磁性液体作为可控光开关提供了可行性研究。

关键词:磁性液体; 开关效应; 弛豫时间; 光关闭时间

中图分类号: O414

文献标识码: A

引言

磁性液体通常是由纳米磁性微粒稳定的悬浮于基液中形成的胶体体系, 它同时具有液体流动性和固体的磁性, 现已广泛应用于润滑、密封、印刷、医药等众多领域。制备时, 根据防止纳米微粒间自发团聚的方法不同, 磁性液体可分为表面活性剂型和离子型: 前者在微粒表面包裹一层表面活性剂利用空间位形排斥抗团聚^[1]; 后者使微粒表面带上同种电荷, 利用静电排斥使得磁性液体稳定存在^[2]。近年来, 磁性液体的磁光效应引起众多学者的兴趣, 如双折射现象、法拉第效应、磁色效应等^[3-4]。磁性液体薄片的光透射强度随磁场变化现象则是磁光效应的另一重要研究方面, 从而可以将磁性液体用作磁场传感器、光开关、光强调节器等应用。磁性液体在磁场作用下光透射率变化已有研究, 表明磁性液体的光关闭现象不能维持很长时间, 透射光呈振荡变化^[5]。本工作就磁性液体薄膜在递增磁场下光透射率随时间的变化情况进行了研究, 得出了磁性液体薄膜作为光开关的弛豫时间的变化规律, 延长了光关闭时间, 并从微观结构进行了理论分析。

1 实验部分

1.1 实验装置

激光器 LD 产生的激光束透射过起偏器 P, 经分光镜 F 后被分为两束光 L_1 、 L_2 , L_1 经过偏振片 P_1 后透过磁性液体薄片样品 S_1 照射到 D_1 。光束 L_2 经过偏振片 P_2 后透过处于两块电磁铁 M 中心的磁性液体薄片样品 S_2 照射到 D_2 。 D_1 和 D_2 是相同型号的硅光电池, 它们将 L_1 、 L_2 透射后的光的强弱转化为电流的强弱输入工控电脑进行处理、存储和实时监控, 并输出强度 I_1 、 I_2 , I_1 和 I_2 的差值 ΔI 以及 $\eta = I_1/I_2$ 即光透射率。实验中利用工控电脑控制磁场的加载、切断、大小、变化率, 控制软件是 VisiDAQ。

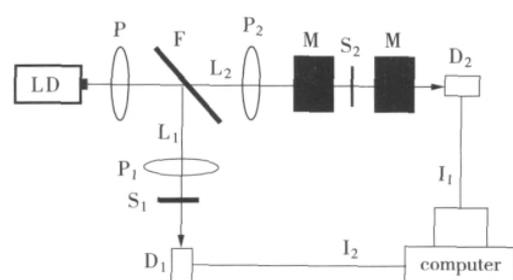


图1 实验装置图

收稿日期: 2011-08-05

作者简介: 白浪(1981-), 男, 四川德阳人, 助教, 硕士, 主要从事磁性纳米材料方面的研究。(E-mail) bailang198183@yahoo.cn

磁场是由中空的轴对称电磁铁 M 产生, 利用霍尔效应管测出其磁感应强度梯度曲线如图 2, 可以看出:

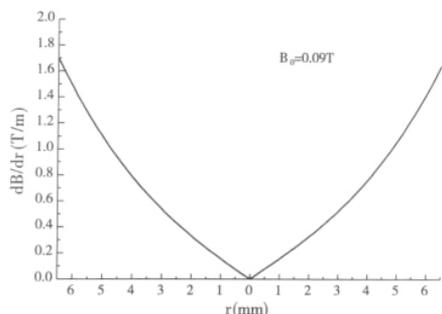


图 2 磁感应强度梯度变化曲线

(1) 磁场沿径向呈梯度分布, $dB/dr \leq 0$, 中心处磁感应强度最大。

(2) 中心处较小范围内 ($-2\text{mm} \sim 2\text{mm}$), 磁场随 r 呈线性变化。

(3) 磁场基本呈轴对称。

1.2 实验过程及结果

以 FeCl_3 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ 、 NaOH 为原料, 采用化学共沉淀法制成 CoFe_2O_4 纳米微粒, 将微粒分散于一定浓度的硝酸溶液中, 振荡均匀后配置成体积分数 (v) 分别为 0.4%、0.6% 的 Massart 法离子型磁性液体。将磁性液体注入 $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的扁平玻璃盒子内作为磁性液体薄片样品。

室温下将样品放入实验装置, 无磁场时, 调节 L_1 角度使 I_1 达到最大, 调节 L_2 使 $I_2 = I_1$, 通过软件控制磁场通断时间、大小、变化率, 对 (v 为 0.4%、0.6% 的样品进行了递增磁场下磁控光开关效应的研究, 所加磁场中心处达到的最大值均为 0.09T。得出光透射率随时间变化曲线如图 3。

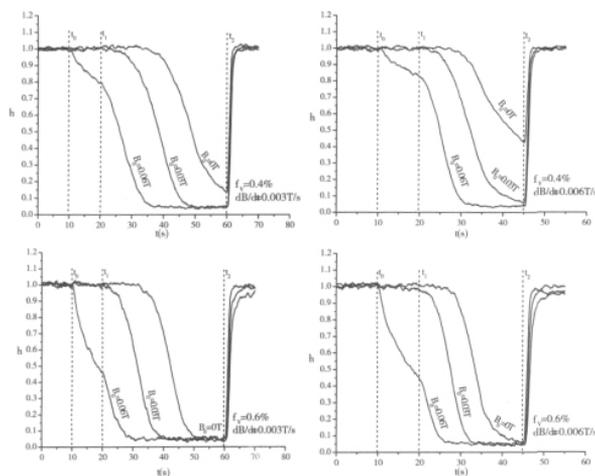


图 3 光透射率变化曲线

图中, $0 \sim t_0$ 时段不加磁场, 光透射率为 1, 设定为 10s; $t_0 \sim t_1$ 时段施加平行于激光方向, 中心处磁感应强度为 B_0 的稳恒磁场, 设定为 10s; $t_1 \sim t_2$ 时段加递增磁场, 直到中心处磁感应强度为 0.09T 并保持 10s 后去掉磁场。定义加上磁场到光强为零 (因存在自然光和电路噪声影响, 透射率小于 0.1 时视为光关闭) 所需的时间为弛豫时间, 实验数据如表 1 和表 2。

表 1 递增磁场下磁性液体薄片的光关闭时间

B_0	0.4%		0.6%	
	0.003T/s	0.006T/s	0.003T/s	0.006T/s
0T	0	0	10	0
0.03T	12	0	21	12
0.06T	24	14	35	19

表 2 递增磁场作用下磁性液体弛豫时间

B_0	0.4%		0.6%	
	0.006T/s	0.003T/s	0.006T/s	0.003T/s
0	>50	>35	40	35
300	32	>35	29	23
600	25	22	20	16

2 分析讨论

2.1 光关闭的形成

通过对磁性液体 TEM 图片分析, 微粒粒径呈对数正态分布, 平均粒径约为 12.76 纳米^[6], 小于磁单畴临界尺寸, 可看作磁偶极子^[7], 磁场作用下, 微粒磁矩会转向外场方向, 由于微粒间静磁引力, 微粒首尾相连沿磁场方向形成链状结构 (如图 4)^[8]。

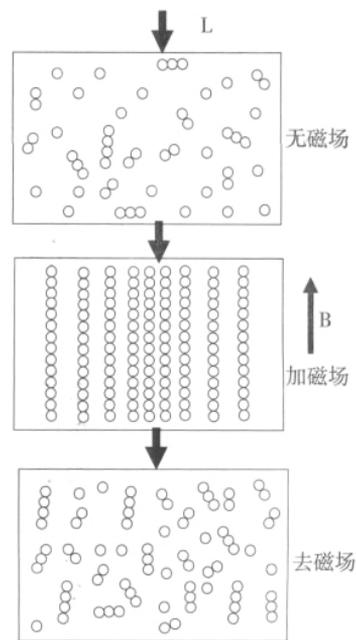


图 4 磁性液体薄片在磁场作用下的微观结构

已有研究表明,光透射过磁性液体薄膜时,散射可以不予考虑^[9],光能量被磁性液体中纳米微粒吸收,微粒链越密集,光吸收越强,可将光强与光吸收相联系。将整条链视为磁矩为 \vec{M} 的磁偶极子,在同轴柱对称磁极的电磁铁装置中 $B_r \ll B_z$, $B_\phi = 0$, $\vec{M} = M_z e_z + M_r e_r$ (M_z 为磁矩在 z 轴的分量, M_r 为磁矩在 r 轴的分量)。磁场存在径向梯度 ($B_r \propto 1/r$), 且 ($B_r / r < 0$), 则微粒链将受到指向磁场中心的汇聚力 F_r :

$$F_r = M_z \left(\frac{\partial B_z}{\partial r} + \frac{B_r}{B_z} \frac{\partial B_r}{\partial r} \right) \approx -M \left| \frac{\partial B_r}{\partial r} \right|$$

微粒链向光斑聚集,透射光减弱,甚至完全吸收,形成光关闭状态。同时,微粒链之间还存在磁排斥力 F_M 以及电排斥力 F_e , 会使得靠近微粒链迅速排开而导致透射光反而增强,出现振荡变化,光关闭时间也很短,仅 10 秒左右,且不可控制,不适宜作为光开关使用^[5]。

2.2 光开关效应

为延长光关闭时间,采用递增磁场,实验曲线如图 3。可见,光透射率随着磁场变化有着不同的弛豫时间和光关闭时间。

(1) 初始磁场和磁场变化率相同的情况下,体积分数越低,弛豫时间越长。如: ($\phi_v = 0.4\%$ 的磁性液体, $B_0 = 0T$ 时,加磁场 40s 后仍未出现光关闭。体积分数越低,磁性液体中微粒链数目少,要全部汇聚到中心处的时间也越长。通过增大磁性液体的体积分数可以达到减小弛豫时间的目的。

(2) 体积分数和磁场变化率相同的情况下,初始磁场 B_0 越大,光关闭时间越长,弛豫时间越短。研究表明,中心磁场越大,相应的磁场梯度也越大^[9],微粒链会越粗,链磁矩增大^[10-11]。微粒链间汇聚作用力随中心磁场而增大,运动速度加快,透射率迅速减小,如: ($\phi_v = 0.6\%$ 的磁性液体, $B_0 = 0.03T$ 时,10s 后透射率仍为 0.95,而 $B_0 = 0.06T$ 时,10s 透射率降为 0.45,弛豫时间缩短。但微粒链间静电排斥力随距离减小而显著增大^[7],微粒链汇聚到一定距离后因排斥作用而迅速相互弹开,即光透射率达到最小后又迅速增大,导致光关闭时间会较短,增大中心磁场可以缩短弛豫时间。但磁场增大到一定程度,磁性微粒在汇聚力作用下表面电荷会脱落而形成不可逆的团聚体,应选取合适磁场强度。

(3) 体积分数和初始磁场相同的情况下, dB/dt 越大,弛豫时间越小,光关闭时间延长。如: ($\phi_v = 0.6\%$ 的磁性液体, $dB/dt = 0.003T/s$ 时,弛豫时间最小为

20s, $dB/dt = 0.003T/s$ 时,则为 16s,弛豫时间随 dB/dt 增大而减小。结果表明,无论 dB/dt 的大小,样品达到光关闭状态后就一直保持到断开磁场,不会出现光强再增大的现象。实验中光关闭时间已达到 35s,是稳恒磁场下光关闭时间的 3 倍以上。可见,施加递增磁场可以减缓微粒链相互排斥,克服微粒链间静电排斥力引起的光强“振荡”现象,延长光关闭时间。

实验结果表明,改变磁性液体体积分数、外磁场变化率、初始磁场大小可以达到控制调节磁性液体的弛豫时间和光关闭时间的效果,为磁性液体作为磁控光开关提供了可行性研究。

3 结论

磁性液体光透射率变化能灵敏的反映磁性液体内部的微观变化过程,磁性液体在外磁场作用下会沿着磁场方向形成链状结构,微粒链粗细取决于外场大小。在梯度的外场下,微粒链向着磁场最大处运动,导致此处光通量减小至零,达到光关闭状态。通过增大磁性液体体积分数,加大初始磁场可以缩短光关闭弛豫时间。由于微粒链间还存在静电排斥和静磁排斥力,与磁场的会聚力一起使得了光透射率的呈振荡变化,导致光关闭时间较短。通过给磁性液体薄片加梯度磁场可以逐步克服微粒链间排斥力作用,缓冲其排斥作用,延长光关闭时间。因此,合适的选择体积分数、初始磁场和磁场变化率,可以得到适合应用的磁性液体光开关。

参考文献:

- [1] Chastellain M, Petri A, Hofmann H. Particle size investigation of a multistep synthesis of PVA Coated superparamagnetic nanoparticles [J]. Journal of colloid and Interface Science 2004 278(2): 353-360.
- [2] Massrt R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media [J]. IEEE, 1981, 17(2): 1247-1248.
- [3] Raikher Yu L, Scholten P C. Magnetic colloid in an AC magnetic field: constant birefringence effect [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1988, 74(3): 231-232.
- [4] Maierov M M. Faraday effect in magnetic fluids at a frequency 10GHz [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2002 252: 111-113.
- [5] Li J, Liu X D, Lin Y Q et al. Field-induced transmission

- of light in ionic ferrofluids of tunable viscosity [J]. Journal of Physics D: Apply Phys. 2004(24) :3357-3360.
- [6] 白浪,于娟. CoFe₂O₄ 磁性液体冰冻前后的磁性 [J]. 科技导报 2010 28(17) : 54-57.
- [7] 白浪 粒子型磁性液体中纳米微粒间相互作用研究 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版 2010 23(2) : 235-237.
- [8] Zubarev Y ,Iskakova L Y. Chain-like structures in polydisperse ferrofluids [J]. Physca A ,2004 ,335: 314-324.
- [9] Mircea R. Improved formulas for magneto-optical effects in ferrofluids [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials ,1999 201: 178-181.
- [10] 白浪 李建 黄彦 等. 磁性液体的场致透光特性 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版 2006 31(1) : 66-69.
- [11] Liu J ,Lawrence E M ,Wu A ,et al. Field-induced structures in ferrofluid emulsion [J]. Physics Review Letter ,1995 74(14) : 2828-2831.
- [12] Ytreberg F M ,Mckay S R. Calculated properties of field-induced aggregates in ferrofluids [J]. Physics Review E 2000 61(4) : 4107-4110.

Study on Magnetic-controlled Light-switch Effect of Ferrofluid Film

BAI Lang¹ , YU Juan²

(1. School of Material Engineering , Panzhihua University , Panzhihua 617000 , China;

2. School of Electric and Information Engineering , Panzhihua University , Panzhihua 617000 , China)

Abstract: The variation of optical transmittance through ferrofluid film under gradually increasing and gradient magnetic field in parallel to the direction of laser propagation over time has been studied. The result shows that magnetic nano-particles forms chainlike structure when external magnetic field is applied. Particle chains aggregates toward the center of the film because of the converged force under gradient magnetic field , and induced the light channel shut off phenomenon in the center of the film. The relaxation time and light-off time of ferrofluid used as light switch can be controlled by changing ferrofluids' volume fraction , increase rate of external magnetic field , and initial magnetic intensity. This work provides a feasibility study of ferrofluid used as optical switch.

Key words: ferrofluids; light-switch; relaxation time; light-off time