

磁性液体复合体在外磁场中的圆双折射 效应和二向色性

黄纪圣 都有为 胡济通 钟 伟 陆怀先
高学奎 史莹冰 吕 宁

(南京大学固体微结构物理实验室, 南京 210008)

苗永智 马光群

(南京大学物理系, 南京 210008)

提 要

研究了由非磁性聚苯乙烯颗粒弥散于煤油基 Fe_3O_4 磁性液体中制备而成的磁性液体复合体. 该复合体双折射效应和线二向色性随外磁场变化. 在相同的磁场条件下, 复合体的双折射效应较纯磁性液体有减弱而二向色性较后者有所增强. 文中采用一简化模型对结果给出了解释.

关键词 磁性液体复合体, 双折射, 二向色性.

1 引 言

磁性液体的磁致双折射现象 1974 年 Martinet 已有所报道^[1], 1983 年 Taketomi 发现 Fe_3O_4 磁性液体薄膜的反常圆 Cotton-Meuton 效应较硝基苯大 10^7 倍^[2], 更引起了人们浓厚的兴趣.

在磁性液体中掺入直径大约几微米的非磁性聚苯乙烯球状颗粒, 形成所谓磁性液体复合体, 当此复合体在外磁场中磁化时, 处于其中的非磁性颗粒, 将形成磁化介质中的“空穴”, 由于这些“空穴”的表面磁荷作用, 它们将成为磁矩方向与介质磁化方向相反的磁偶极子, 在不同的外磁场条件下, 由于磁偶极相互作用, 非磁性球状颗粒将形成不同的有序排列结构^[3], 从而显著影响该磁性液体复合体的磁光效应.

本文着重研究磁性液体薄膜样品的磁双折射效应和线二向色性.

2 样品制备与实验商量方法

用化学共沉淀工艺生成尺度约 10 nm 的超微 Fe_3O_4 颗粒, 以油酸为表面活性剂, 以煤油为

收稿日期: 1992 年 3 月 2 日; 收到修改稿日期: 1992 年 4 月 23 日

* 本工作得到国家自然科学基金资助与磁学国家实验室部分资助.

基液制备成磁性液体. 聚苯乙烯小球用化学凝聚法制备. 小球平均直径约 $5 \mu\text{m}$. 将一定质量的聚苯乙烯小球弥散布在 Fe_3O_4 磁性液体中即制成磁性液体复合体. 测试样品由将上述复合体夹在两层薄玻璃片之间, 四周再以胶密封制成. 样品具体规格如图 1 所示. 所用玻璃片为 $18 \times 18 \text{ mm}^2$, 厚约 $150 \mu\text{m}$, 其中一片上蒸镀一层厚度为 d 银膜, 本实验约 $10 \mu\text{m}$. 磁性液体复合体滴在两侧银膜的间隙中, 且夹在两薄玻璃片之间, 因此复合体膜层厚度即为银层厚度.

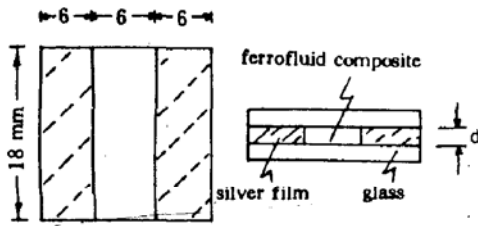


Fig. 1 The sample for measurements

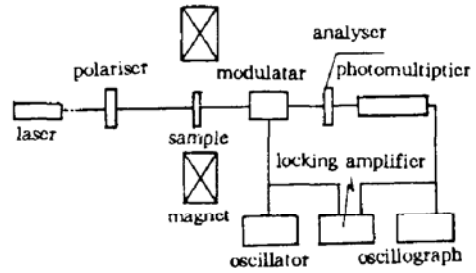


Fig. 2 Schematic diagram of apparatus used for birefringence measurement

双折射效应测量装置如图 2 所示. 光源为 2 mW 的 He-Ne 激光器, 入射到样品上的线偏振光经双折射后, 变为椭圆偏振光(在本文条件下, 因样品很薄, 出射的椭圆偏振光较扁), 此椭圆长轴与入射光线偏振方向间夹角可由图 2 所示的装置用标准方法测出. 其中检偏品精度为 $30''$.

调整入射光束方向使其与电磁铁产生的外磁场 H 方向垂直, 设由起偏器产生的线偏振光的电矢量 E 与磁场 H 间夹角为 θ , 由下式定义表征样品线二向色性的吸收系数 $h_j(H)$.

$$I_j(H) = I_0 \exp[-2h_j(H)], \quad (1)$$

式中 $j = 1, 2$ 分别表非寻常光(e 光)和寻常光(o 光) $I_j(H)$ 为磁场 H 时的透射光强, I_0 则表示 $H = 0$ 时的透射光强. 设入射线偏振光经样品双折射后引起的 e 光和 o 光间的相位差为 α , 则由简单运算可知, 出射椭圆偏振光长轴与外磁场 H 方向的夹角 β 满足

$$\left. \begin{aligned} \tan 2\beta &= 2\sqrt{k} \cos / (\text{ctg} \theta - k \tan \theta), \\ k &= \exp[-2h_2(H)] / \exp[-2h_1(H)] = \exp[-2(h_2 - h_1)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这时 $\Theta = \theta - \beta$ 即为入射线偏振光偏振方向与透射椭圆偏光长轴夹角, Θ 与 θ 都可通过实验直接测出, 将此关系代入(2)式有

$$\cos \alpha = (\text{ctg} \theta - k \tan \theta) \tan 2(\theta - \Theta) / 2\sqrt{k}. \quad (3)$$

由此可见, 必须事先测出表征二向色性的系数 k , 才能由 θ 与 Θ 值定出双折射的相位差 α .

一般晶体的双折射由补偿法测量, 在二向色性显著时, 要测量 I_{\max} 与 I_{\min} 方可求出 α , 在此本文给出另一种求 k 与 α 的方法.

保持外磁场 H 不变, 由旋转起偏改变入射线偏振光 E 矢量与 H 的夹角 θ , 在本实验中选择两个特定的 θ 值, θ_1 和 θ_2 , 然后测量出相应的偏转角 Θ_1 和 Θ_2 , 因为对特定的测试样品, 在确定

的外场 H 下,其 α 值固定,所以可将两组不同的 θ_1, θ_1 和 θ_2, θ_2 值代入(3)式消去 $\cos \alpha$,由此可求出在相应磁场 H 下的 k 值

$$k = \frac{\text{ctg } \theta_1 \tan 2(\theta_1 + \theta_1) - \text{ctg } \theta_2 \tan 2(\theta_2 - \theta_2)}{\tan \theta_1 \tan 2(\theta_1 - \theta_1) - \tan \theta_2 \tan 2(\theta_2 - \theta_2)} \quad (4)$$

将此 k 值代入(3)式即可求得相应的 α 值.

与此同时,实验亦以图 3 所示装置直接测量了 $[I_2(H)/I_0] = \exp[-2h_2(H)]$,由此算出 $k = \exp[-2(h_2 - h_1)]$,结果与此符合.

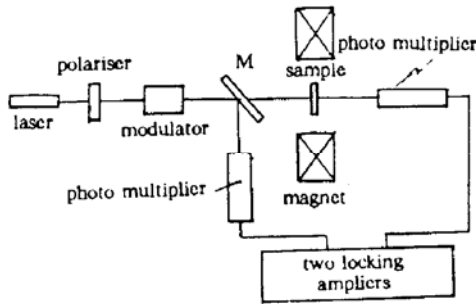


Fig. 3 Schematic diagram of apparatus used for linear dichroism measurements

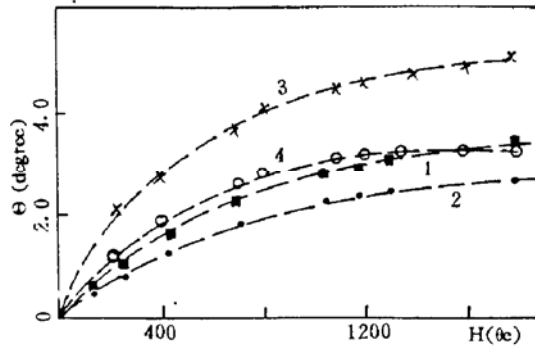


Fig. 4 The curves for samples a and b

1—sample a at $\theta = 45^\circ$, 2—sample a at $\theta = 60^\circ$

3— sample b at $\theta = 45^\circ$, 4—sample b at $\theta = 60^\circ$

3 实验结果

实验所用样品为: a) 纯煤油基 Fe_3O_4 磁性液体,磁化强度 σ 为 33.2 e. m. u. /g; b) 在上述磁性液体中每毫升 0.05 g 非磁性聚苯乙烯颗粒小球,复合体的磁化强度 σ 为 32.6 e. m. u. /g; 对比测量样品 a, b 的有关特性即可对非磁性小颗粒对磁光特性的影响作出分析,所用样品液膜厚度 d 均为 $10 \mu\text{m}$ 左右.

在 $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$ 时样品 a, b 的 θ_1, θ_2 随外磁场 H 的变化情况示于图 4,由图中可见,复合体样品 b 的偏转角 θ 随外场 H 的变化规律与纯磁性液体 a 大致相同,但在相应的条件下,复合样品 b 的偏转角 θ 比纯样品 a 要大.

由(3)式算出的样品 a, b 的二向色性相对吸收率 k 随外场 H 的变化示于图 5, k 的直接测量值示于图 6,对照此两图可见,结果相当一致.由此,按(3)式即可算出样品 a, b 的双折射位差 α ,两者 α 随 H 的变化曲线示于图 6.由图 5、图 6 和图 7 可知,复合样品 b 的双折射效应较纯磁性液体 a 明显减弱(α 变小),其二向色性则比纯样品 a 显著增强(k 值更偏离 1,当 $k = 1$ 时无二向色性).由此可见,磁性液体中的非磁性颗粒确实显著地影响样品的双折射和磁二向色性.

在相同的外磁场 H 和相同的 θ 角下,复合样品 b 的偏转角 θ 较大主要原因是它的二向色性较大的缘故.由(2)式可知: α 越大, θ 越大; k 越小(二向色性越大), θ 越大;复合样品 b 的相位差

α 较纯样品 a 为小, 所以它的偏转角 θ 大只能来自较大的二色性的贡献.

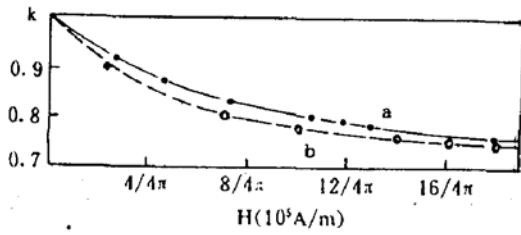


Fig. 5 The linear dichroism k curves for samples a and b (by theoretical)

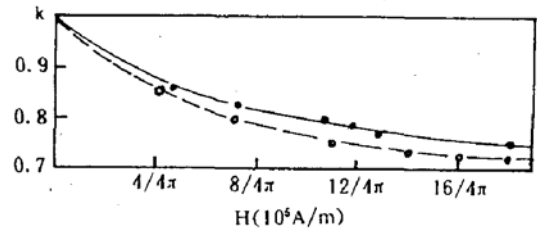


Fig. 6 The linear dichroism k curves for samples a and b (by measurements)

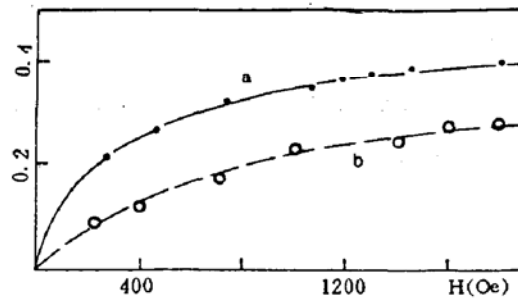


Fig. 7 The phase difference α curves for samples a and b

4 讨 论

如所周知, 介质系统的双折射取决于它对 \circ 光 e 光的折射率之差, 而后者又取决于其表现介电张量的对角元, 即

$$\alpha = (2\pi d/\lambda_0)(n_{\perp}n_{\parallel}) = (2\pi d/\lambda_0)(\sqrt{\epsilon_{11}} - \sqrt{\epsilon_{33}}). \tag{5}$$

因此讨论双折射问题的关键在于用适当的模型求出复合体 ϵ_{11} 、 ϵ_{33} 与其各种参量的关系.

显微镜下的观察发现; 在磁场中磁性液体内悬浮的 Fe_3O_4 颗粒联结成链状结构, 并大致沿磁场方向排列; 复合体中的非磁性小球则在相当低的外场下就已形成外场整齐排列的链结构. 作为近似, 假定 Fe_3O_4 颗粒为直径相同的小球, 彼此紧靠形成长度相同的“棒”, 该棒的体积为 V_1 , 在复合体中的 Fe_3O_4 棒数为 N_1 ; 同样, 非磁性小球亦彼此相同, 互相紧靠形成体积为 V_2 的“棒”, 在复合体中的数密度为 N_2 ; 两种棒退极化因子沿棒方向均为零而沿垂直棒方向均为 $1/2$; 若令 Fe_3O_4 、聚苯乙烯和煤油的介电常数分别为 $\epsilon^{(1)}$ 、 $\epsilon^{(2)}$ 和 $\epsilon^{(e)}$; 在外电磁场(电磁波)作用下上述三种介质中的电场分别为 $E^{(1)}$ 、 $E^{(2)}$ 和 $E^{(e)}$, 则由文献[4]可知, $E^{(1)}$ 、 $E^{(2)}$ 和 $E^{(e)}$ 满足下述关系

$$(1 - n_k) \epsilon^{(e)} E_k^{(e)} + n_k \epsilon^{(i)} E_k^{(i)} = \epsilon^{(e)} E^{(e)}, \tag{6}$$

上式中 $i = 1, 2$, $k = 1, 2, 3$ 分别表示固定于棒的正交坐标系的三个坐标轴方向, 其中 $k = 3$ 沿棒方向, 而 $k = 1, 2$ 垂直于棒, E_k 为电场的 k 方向分量, n_k 为棒沿 k 方向的退极化因子. 考虑到棒内区域的电位移矢量与电场的关系, 将棒的退极化因子数值代入, 将所有“棒”对介质表现介

电张量的贡献求和,对方向求平均,即可求出 ϵ_{11} 和 ϵ_{33} ,从而导出在确定外磁场 H 中厚度为 d 的样品的双折射相位差为

$$\alpha = \frac{2\pi d}{\lambda_0} \left[\sum_{i=1}^2 N_i V_i \frac{\epsilon^{(i)} - \epsilon^{(e)}}{\epsilon^{(i)} + \epsilon^{(e)}} \epsilon^{(i)} + \epsilon^{(e)} \left(1 - \frac{3L(\zeta_i)}{\zeta_i} \right) \right] / \left\{ \left[\epsilon^{(e)} + \sum_{i=1}^2 N_i V_i \frac{\epsilon^{(i)} - \epsilon^{(e)}}{\epsilon^{(i)} + \epsilon^{(e)}} (\epsilon^{(e)} + \epsilon^{(i)} \frac{L(\zeta_i)}{\zeta_i}) \right]^{1/2} + \left[\epsilon^{(e)} + \sum_{i=1}^2 N_i V_i \frac{\epsilon^{(i)} - \epsilon^{(e)}}{\epsilon^{(i)} + \epsilon^{(e)}} (\epsilon^{(e)} + \epsilon^{(i)} - 2\epsilon^{(e)} \frac{L(\zeta_i)}{\zeta_i}) \right]^{1/2} \right\}, \quad (7)$$

这里 $\zeta_i = (\mu_i H / k_B T)$, μ_i , $i = 1, 2$ 分别为 Fe_3O_4 和聚苯乙烯颗粒棒的磁矩, k_B 玻尔兹常数, T 为绝对温度, $L(\zeta) = \coth \zeta - (1/\zeta)$ 为朗之万函数. 若考虑对 Fe_3O_4 , 煤油和聚苯乙烯三种介质, 在光频段有关系 $\epsilon^{(1)} > \epsilon^{(e)} > \epsilon^{(2)}$, 考察(7)式可发现, 这时分子上求和的两项符号相反, 因为 $N_i V_i$ 比 1 小许多, 分母对 α 值的影响要比分子小, 所以复合样品 b 的双折射当然较纯磁性液体 a 为小, 而分子上各项中的因子 $[(1 - 3L(\zeta_i)/\zeta_i)]$ 则反映了 α 随外场 H 增大而趋向饱和的趋势, 这些都能与实验结果基本符合.

复合体对光的吸收可由计算介质颗粒棒中的电极化矢量, 然后算出单棒的吸收截面而进一步导出复合体的二向色性由 k 值表征, 由上述途径, 算出吸收系数 $h_1(H)$, $h_2(H)$ 与 $k(H)$ 如下

$$\begin{aligned} h_1(H) &= \frac{d}{12\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right)^2 \sum_{i=1}^2 (N_i V_i) V_i \left[\epsilon^{(i)} - \epsilon^{(e)} \right]^2 \epsilon^{(e)2} \left[1 - \frac{(\epsilon^{(i)} + 3\epsilon^{(e)})(\epsilon^{(i)} - \epsilon^{(e)})}{(\epsilon^{(i)} + \epsilon^{(e)})^2} \cdot \frac{L(\zeta_i)}{\zeta_i} \right], \\ h_2(H) &= \frac{d}{12\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right)^2 \sum_{i=1}^2 (N_i V_i) V_i \left[\frac{\epsilon^{(i)} - \epsilon^{(e)}}{\epsilon^{(i)} + \epsilon^{(e)}} \right]^2 \cdot [4\epsilon^{(e)} + 3\epsilon^{(e)}](\epsilon^{(i)} - \epsilon^{(e)}) \frac{L(\zeta_i)}{\zeta_i}, \\ k(H) &= \exp\{-2[h_2(H) - h_1(H)]\} \end{aligned} \quad (8)$$

在(8)式中令 $N_2 = 0$, 即可得到纯磁性液体的吸收系数表式, 考虑到 $\epsilon^{(1)} > \epsilon^{(e)}$, 由(8)式可见, h_1 将随 H 增大而增大, 而 h_2 则随 H 增大而减小, 这与 h_2 的实验规律显然不符^[2]. 对这个问题的解释是: 棒的体积不变是一个过于粗糙的假设, 实际上显微镜下的观测就可发现(将一块较强的永久磁体沿一定方向缓缓靠近样品薄膜), 随着磁场的增大“棒”会变长、变粗, 即其体积会有所增加在(8)式中可看出 h_1 正比于 $(N_i V_i) V_i$ 的乘积, $N_i V_i$ 不变, V_i 增大将引起 h_1 的增加, 对于 h_2 , 只要这一增大的趋势大于(8)式中第二式方括号内后一项减小的趋势, 则 h_2 仍随 H 增加而增大, 只是增大的趋势变慢而已. 在这一理解的基础上, 考虑到 $\epsilon^{(2)} < \epsilon^{(e)}$, 由(8)式可见, 非磁性颗粒所贡献的 h_2 部分随 H 的增加增大的趋势显然比纯磁性液体快, 而非磁性颗粒贡献的 h_1 部分随 H 变化的趋势则相反变慢, 因而复合体的 $k = \exp[-2(h_2 - h_1)]$ 比纯磁性液体小, 即其二向色性比纯磁性液体强是显而易见的, 与实验结果完全一致.

综上所述, 理论分析与实验测量都表明, 在磁性液体中一定浓度的非磁性颗粒的存在将显著影响样品的磁双折射效应和二向色性. 因此, 适当选择磁性液体和非磁性颗粒的种类调节其中磁性和非磁性颗粒的浓度, 有可能制备出有合适磁光特性的样品, 从而研制相应的磁光器件铺平道路.

参 考 文 献

- [1] P. A. Martinet, Birefringence et dichroïsme lineaire des ferrofluides sous champ magnetique. *Rheol. Acta*, 1974, 13: 260~264

- [2] S. Taketomi, Magnetic Fluid's anomalous pseudo-Cotton Mouton effects about 10^7 times larger than that of nitrobenzens. *Japan J. Appl. Phys*, 1983, 22(12):2327~2336
- [3] A. T. Skejeltorp, Ordering phenomena of particles dispersed in magnetic fluids (invited). *J. Appl. Phys*, 1985, 57(8):3285~3290
- [4] Landau, Lifshitz, *Electromagnetics of Continuous Media*. Pergamon, Oxford(1960)

Pseudo-birefringence and dichroism of ferrofluid* composites in applied magnetic field

KUI Jisheng DU Youwei HU Jitong ZHONG Wei LU Huaixian
GAO Xuekui SHI Yingbing LU Ning

(National Laboratory of Solid state Microstructure, Nanjing University, Nanjing 210008)

MIAO Yongzhi MA Guangqan

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008)

(Received 12 August 1991; revised 23 December 1991)

Abstract

Ferrofluid composites consist of non-magnetic polystyrene particles dispersed in a kerosene-based ferrofluid. Their birefringence and dichroism in applied magnetic field were measured. In experiments it was found that under the condition of the same magnetic field, 1) the birefringence of ferrofluid composites is smaller than that of pure ferrofluid; 2) the linear dichroism of the composite samples is stronger than that of the pure ones. With a simple theoretical model, the results are explained.

Key words ferrofluid composites, birefringence, dichroism.