

磁液磁光双稳特性的研究*

潘应天 杜从武 刘贤德 李再光

(华中理工大学光学系, 武汉 430074)

提 要

本文基于磁液磁致双折射效应, 实现了其磁光双稳特性的研究。理论上, 建立了其磁光双稳传输模型、进行了计算机模拟, 并在此基础上建立了相应的实验分析系统。研究表明: 磁液薄膜具有良好的磁光双稳特性, 可用作超长波红外波导器件。

关键词: 磁液、磁光、双稳态。

一、引 言

磁液磁光效应(磁致双折射、磁二向色性以及法拉第效应)的研究是一个崭新的领域, 表现出的磁光特性引人注目, 具有广泛的应用前景。如, Martinet^[1]报道的磁液磁光开关, Chung等^[2]报道的磁液光纤磁传感器的研究。本文旨在根据磁液随外磁场表现出强磁致双折射效应, 研究其磁光双稳特性, 开拓磁液磁光双稳、光放大及光存贮器件的研究。文中还根据实验指出磁液在红外波段存在良好的透过窗口以及作为新型红外磁光波导器件研究的可能性。

二、磁液磁致双折射效应

磁液是由亚畴(直径 $\bar{D} \leq 10 \text{ nm}$)强铁磁(Fe, Co, Ni)或铁氧体(Fe_3O_4)微粒均匀分散到有机载液中所形成的稳定磁性胶液。研究表明^[3]: 磁液具有较强的磁致双折射效应, 其折射率差 $\Delta n (= n_e - n_o)$ 可达 8×10^{-3} , n_e 、 n_o 分别为平行及垂直于磁场方向的折射率。随着研究的深入, 人们逐渐揭示出: 在外磁场 H 作用下, 磁液中磁粒子受外磁场及静磁相互作用, 使其沿磁场方向排列形成线形磁链是导致其呈强磁致双折射特性的根本原因。

模型 I: Scholten 等根据磁液中磁粒在外磁场 H 中转动引起各向异性 ΔP , 并忽略粒子间磁偶极相互作用(稀液近似), 导出其磁致双折射^[4]:

$$\Delta n = \Delta n_s [1 - 3L(\xi)/\xi], \quad (1)$$

式中 Δn_s 为 Δn 之饱和值, $L(\xi)$ 为朗之万函数, $\xi = (\mu H/kT)$, μ 为磁粒磁矩, $k \cdot T$ 分别为玻尔兹曼常数和温度(K)。

模型 II: Taketomi 等则基于无磁偶相互作用之线形粒子链的假设, 导出磁致双折射相差角, 即经磁液后 e 、 o 光之相差^[5]

收稿日期: 1990年9月24日; 收到修改稿日期: 1991年2月4日

* 本课题得到国家自然科学基金的资助。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{2\pi(d/\lambda)\sqrt{\varepsilon^{(e)}}\phi'PQ[1-3L(\xi)/\xi]}{\{1+\phi'P[1+QL(\xi)/\xi]\}^{1/2} + \{1+\phi'P[1+Q-2QL(\xi)/\xi]\}^{1/2}}, \\ P &= \frac{\varepsilon^{(i)} - \varepsilon^{(e)}}{\varepsilon^{(i)} + \varepsilon^{(e)}} \quad Q = \frac{\varepsilon^{(i)}}{\varepsilon^{(e)}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\varepsilon^{(i)}$ 、 $\varepsilon^{(e)}$ 分别为磁粒子链及载液的介电常数； d 、 λ 分别为磁液膜厚和光波长， ϕ' 则为链化粒子体积比浓度。

该模型基本上反映了 $\theta \sim H$ 的变化规律，但当 $H < 700 \text{ Oe}$ 时， θ 明显低于实验值。这主要是因以上两模型均未考虑磁粒间磁偶相互作用的影响；特别是在小场时，这一扰动显得更为明显。研究表明^[5,6]：磁液起始磁化率 χ_i 和磁致双折射 θ 随温度的变化亦有 Curie-Weiss 特性，即

$$\left. \begin{aligned} \theta_H^{-1} &\propto [T - T_0(H)], \\ \chi_i^{-1} &\propto (T - T_0), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 T_0 为居里温度， $T_0(H)$ 仅为 H 的函数， θ_H 为在磁场 H 作用下的磁致双折射相位角。

由此，作者设想利用 Weiss 分子场 H_w 表示磁液中磁粒的磁矩间相互作用，对模型 II 加以修正，即

$$H' = H + H_w, \quad (4)$$

式中 H 为外磁场， $H_w = wM$ ， M 为其磁化强度， w 为分子场系数。

图 1 中的点线、虚线、点划线以及实线分别对应于模型 I、模型 II、修正模型以及实验曲线。显而易见，修正后的模型曲线与实验吻合得甚好，特别是低场情况^[7]。

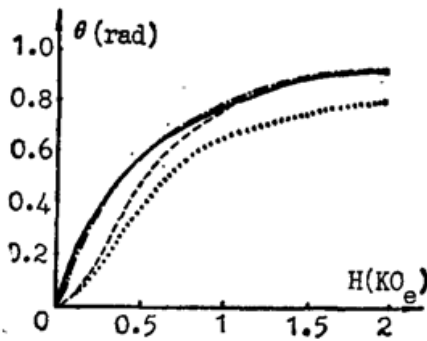


Fig. 1 Theoretical curves of the magneto-birefringence of a ferrofluid thin film

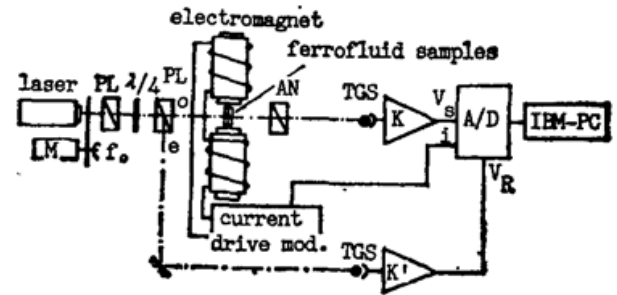


Fig. 2 Experimental arrangement for measuring the magneto-optical effects of ferrofluids

图 2 即为磁液磁致双折射 Δn 及磁二向色性 ΔK 的测试系统。改变 H ，通过旋转起偏 (PL)、检偏 (AN) 器的偏振方向即可测得 Δn 、 ΔK 随 H 变化曲线。该系统的特点是通过 PL 和 $\lambda/4$ 波片对入射激光偏振态整形，再由格兰-汤姆逊棱镜 (PL) 双窗输出 o 、 e 光：一束经磁液薄膜为信号光；另一束为参考光。经光电转换及双路 A/D 采样后输入微机处理，即可消除光源偏振态及功率的扰动，实现高精度检测。图 3 即为三种磁液薄膜的 $\Delta n \sim H$ 曲线 (均为 Fe_3O_4 磁液，其分别对应于脂基、烃基和水基、体积比浓度分别为 0.104, 0.099, 0.094)。可见， $11 \mu\text{m}$ 厚磁液薄膜 (样品 1) θ 可高

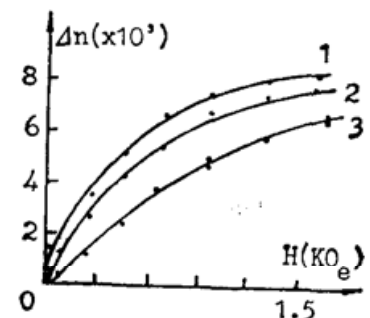


Fig. 3 Experimental results showing the dependence of Δn and H

达 0.84 rad, 具有相当强的磁致双折射效应。随其性能改善, 所需磁场 H 可进一步降低而 θ 还可适当增大。

三、磁液磁光双稳特性

光学双稳态即为对于一定的输入光强 (I_i), 存在两种可能转换的输出光强 I_o 状态, 可由在具有非线性透光材料上加以与 I_o 成一定相关程度之正反馈来实现, 其中介质的非线性特性尤为重要。而以上研究表明磁液具有相当强的磁致双折射效应, 仅 11 μm 厚磁液膜其 θ 即有 0.84 rad; 为此, 考虑研究其磁光双稳及光放大特性。

1. 磁液磁光透过特性

当磁液薄膜被置于磁场 H 中, 由于磁致双折射及磁二向色性, 透射光强及相位均随 H 改变。如图 4 所示, 令 $[M]_{PL}$ 、 $[M]_f$ 、 $[M]_{AN}$ 分别为起偏器、磁液薄膜及检偏器的透射矩阵。忽略其磁二向色性的影响, 可由琼斯矩阵表示

$$[M]_{PL} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, [M]_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix}, [M]_{AN} = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & (1/2)\sin 2\beta \\ (1/2)\sin 2\beta & \sin^2 \beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

于是, 经过系统后的光场

$$\begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{bmatrix} = [M]_{AN} \cdot [M]_f \cdot [M]_{PL} \cdot \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

输出光强

$$I_o = \mathbf{E}_o \cdot \mathbf{E}_o^* = [\cos^2(\alpha - \beta) - \sin \alpha \sin 2\beta \sin^2(\theta/2)] I_i, \quad (7)$$

式中 θ 为 H 的函数(见(2)式)。为获得最佳磁光调制, 即 (dI_o/dH) (或 $dI_o/d\theta$) = 0, 整理可得 $\alpha = 45^\circ$, $\alpha - \beta = 90^\circ$, 即起偏器 PL 与检偏器 AN 取正交组合态, 于是, 透过函数

$$T(\theta) = (I_o/I_i) = \sin^2(\theta/2) = (1 - \cos \theta)/2. \quad (8)$$

同时 θ 随 H 变化, 令 $\theta = \Theta(H)$, 可得光传输函数随 H 的变化关系为

$$\mathcal{T}(H) = \{1 - \cos[\Theta(H)]\}/2. \quad (9)$$

分析(2)式, 随磁液膜厚 d 增大, θ 增大; 当 $\theta \geq \pi$ 时, $\mathcal{T}(H)$ 由单调上升函数变成与 H 的双值对应, 如图 5 所示。

2. 磁光双稳态运转的条件

如图 5 所示, 随 H 增大, 磁液薄膜呈优良的光学非线性。若将 I_o 的一部分反馈控制 H

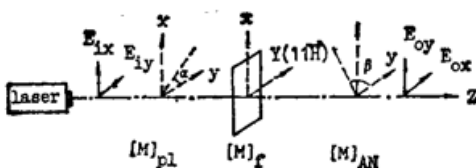


Fig. 4 A sketch of the magneto-optical transmission system

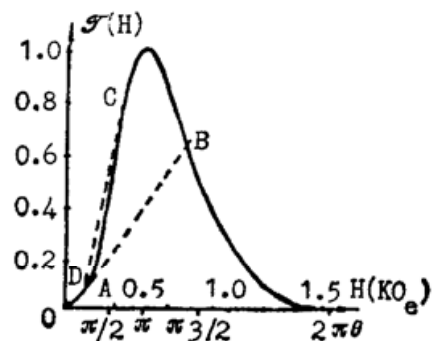


Fig. 5 The transmission curve of a ferrofluid thin film

构成正反馈环,即可构成磁光混合型双稳系统,如图 6 所示。对于反馈网络

$$H = K_e [V_b - V_o] = K_e [K \cdot R \cdot I_o - V_b], \quad (10)$$

式中 K 为输出镜分束比, R 为探测器响应度, K_e 为电子系统增益, H 为流控电磁铁的磁场 (与激励电流成正比), V_b 为可变基准电压。令 $\alpha = K_e R K$, $H_b = K_e V_b$ 。则系统传输函数

$$I_o = \frac{I_i}{(1/2) \{1 - \cos[\theta(\alpha I_o - H_b)]\}} \quad (11)$$

如图 5 所示, V_b 可调整反馈的工作点 H 或 θ (A 点), 于是, $I_i \uparrow (H \uparrow)$, $I_o \uparrow (\mathcal{F}(H) \uparrow)$, 在 $\alpha I_o > H_b$ 时, 由于正反馈作用, 由 A 点骤增至 B 点并趋于饱和 (随 I_i 增大, I_o 增大得缓慢); 同理, $I_i \downarrow$, $I_o \downarrow$, 至 C 点骤减到 D 点, 构成 $ABCD A$ 完整的双稳过程。

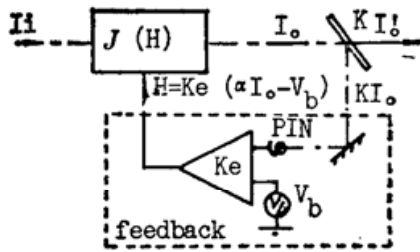


Fig. 6 Schematic diagram of the magneto-optical bistable device of a ferrofluid thin film

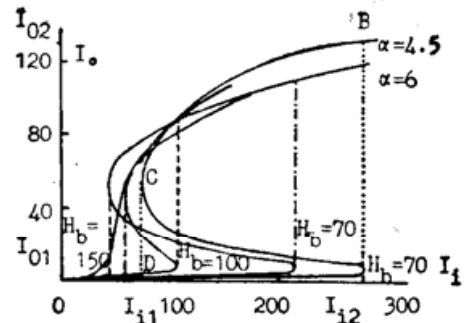


Fig. 7 Theoretical curves of the magneto-optical bistables

为分析反馈深度 K_e 及偏压 V_b 对系统双稳特性的影响, 可将方程 (11) 中 α 、 V_b 等以参变量形式进行计算机模拟, 结果如图 7 所示, 其中三条为双稳曲线, 一条为光放大曲线。其 S 形曲线的中间段为不稳定态, 实际变化过程则是沿 $ABCD A$ 闭环运行。

四、磁液磁光双稳特性的实验分析

图 8 所示实验装置可用于磁液磁光双稳性能测试。激光器输出光强经可变减光器连续衰减, 再经格兰-汤姆逊棱镜 PL 、 $\lambda/4$ 波片、 PL 组态对其偏振态整形, 并分 o 、 e 光各一束。前者经磁液薄膜及检偏器 AN 后输出光强 I_o , 将其一部分输出光强 $K I_o$ 由探测器接收、放大以反馈控制电磁铁中磁场 H ; 后者用于监测 I_i , 双稳曲线由 X-Y 记录仪记录, X 端接 I_i , Y 端接 I_o 。实验中反馈深度和工作点是由压控恒流源功率放大倍数 K_w 及精密可调电压源 V_b 的调整来实现, 两条典型的磁光双稳曲线如图 9 所示。

对于图 7 所示理论曲线, 曲线 1、2、3 为固定 K_w 或 α , 调整 H_b 在 $60 \sim 130$ Oe 时, 系统呈双稳特性, 且随 $H_b \downarrow$, 实现双稳运转所对应的 I_i 变化阈值 I_{i1} 与 I_{i2} 之差增大, 双稳性能改善。随 $H_b \uparrow$, I_o 的高态 I_{o2} 和低态 I_{o1} 几乎不变; I_{o1} 平稳且趋于零 (低态性能好) 但高态 I_{o2} 有一定的变化坡度; 当 $H_b > 140$ Oe, 双稳态消失 (如图 7 中的曲线 3), 输出 I_o 在 $I_i = I_{i3}$ 开始骤增, 存在一段理想的光放大区。计算机模拟知, $H_b \approx 150$ Oe, 小信号光增益 $G = \delta I_o / \delta I_i$ 相当大, 而且随 H_b 进一步增大, G 减小但可资放大的动态范围却增大。固定 $H_b = 70$ Oe, 将 α 由 4.5 增大至 6, 得到曲线 4, 其低态坡度略有增加而高态平稳度却明显改善。

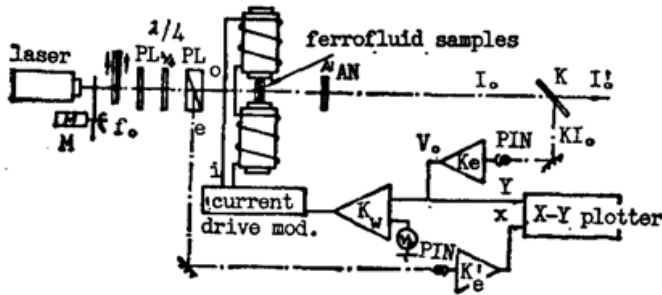


Fig. 8 Experimental setup for measuring the magneto-optical bistable characteristics

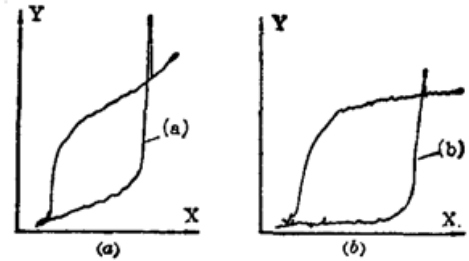


Fig. 9 The experimental results of the magneto-optical bistables

对于图 9 所示实验曲线, $K_{wb} = 1.6 K_{wa}$, 反馈深度增加, 故曲线 (b) 的双稳态平稳性优于曲线 (a)。与图 7 理论曲线相比, 实验曲线的高态平稳性较好, 其原因之一是在建立 $\mathcal{S}(H)$ 模型时忽略了磁二向色性的影响所致。

参 考 文 献

- [1] P. A. Martinet, *Rheol. Acta*, 1976, **13**, No. 2 (Feb), 260~264.
- [2] D. Y. Chung *et al.*; *J. Magn. Magn. Mat.*, 1983, **39**, No. 1/2 (Nov), 71~74.
- [3] S. Taketomi *et al.*; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1983, **22**, No. 7 (Jul), 1137~1143.
- [4] U. Hartmann *et al.*; *J. Magn. Magn. Mat.*, 1984, **41**, No. 1/3 (Feb), 244~246.
- [5] S. Taketomi *et al.*; *Proc. Symp. Magneto-Optics. J. Magn. Soc. Jpn.*, 1987, **11** (Supplement) No. S1, 409~412.
- [6] N. Y. Ayoub *et al.*; *IEEE Trans. on Magn.*, 1989, **25**, No. 5 (Sep), 3860~3865.
- [7] Pan Yingtian, Liu Xiande *et al.*; *CLEO'90, Technical Digest Series*, 21~25, May, 1990, Anaheim California, 330.

Magneto-optical bistability of ferrofluids*

PAN YINGTIAN, DU CHONGWU, LIU XIANDE, LI ZAIGUANG

(Dept. of Optical Engn., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan, 430074, P. R. China.)

(Received September 1990; revised 4 February 1991)

Abstract

Based on its strong magnetically induced birefringence, this paper deals with the research of the magneto-optical bistable characteristics of a ferrofluid thin film. An optical transmission model is proposed and an experimental system is set up to analyse its dependence on the system parameters. Experiments show that the ferrofluid thin film behaves good characteristics of optical bistability and can be used as ultra-long wave optical waveguide devices.

Key words: ferrofluid; magneto-optical; bistable.