

磁性液体薄膜的折射率在外加磁场作用下的变化特性研究

陈善飞 王正良 陆樟猷

(浙江万里学院应用物理研究所, 浙江, 宁波 315101)

摘要 用两块玻璃夹持一层几个 μm 厚的磁性液体薄膜。将这一磁性液体薄膜垂直放置于由亥姆霍兹线圈建立的均匀磁场中。在迈克尔孙干涉仪上用对比测量法测量在不同外加磁场强度作用下磁性液体薄膜的折射率。实验发现, 磁性液体薄膜的折射率随外加磁场强度的变化而变化。结合实验研究, 提出了外加磁场改变了磁性液体颗粒链的大小, 改变了磁性颗粒链的大小和入射光波波长的比值, 从而改变了磁性液体的折射率的设想。初步建立起了磁性液体薄膜的折射率和外加磁场强度之间的关联式。为磁场测量、光学阀门等新型磁光器件的开发提供了新的技术。

关键词 薄膜光学; 磁性液体薄膜; 折射率; 磁场强度

中图分类号 TN2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092901.0273

The Refractive Index Change of Ferrofluid Film Under External Magnetic Field

Chen Shanfei Wang Zhengliang Lu Zhangxian

(Institute of Applied Physics, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315101, China)

Abstract The ferrofluid film (several micrometers thick), located between two glass plates, was placed vertically in the uniform magnetic field produced by the Helmholtz coil. Measurement of the refractive index of the ferrofluid film under different magnetic field intensities with Michelson interferometer by contrast measuring method, shows that the refractive index changes with the variation of the external magnetic field intensity. This phenomenon is explained by the modification of the size of ferrofluid particles under external magnetic field, which changes the ratio of dimension of the chain of magnetic particles to incident wavelength, thus altering the refractive index of the magnetic fluid. Based on this, the relation between the refractive index and external magnetic field intensity is established, which will provide a new technique for the development of new magneto-optical devices for magnetic field measurement, optical valves and so on.

Key words thin film optics; thin ferrofluids film; refractive index; magnetic field intensity

1 引 言

磁性液体 (Magnetic fluid) 是将纳米级的铁磁性颗粒 (如 Fe_3O_4 、 FeN 和 Ni 等) 通过表面活性剂分散到基础液 (如水, 油和脂等) 制备而成的稳定的胶体溶液, 是近十几年来发展起来的一种新型机敏材料。通常的磁性液体为暗褐色, 不透明。但用两块玻璃夹住一层磁性液体, 可以制成厚度只有几个微米的透明薄膜, 这种透明薄膜可以透射光^[1]。

一般的液体薄膜, 诸如密度、浓度、温度等物理量的变化, 均会引起折射率的变化^[2~5]。而磁性液体是一种具有磁化性质的特殊功能液体, 外加磁场会改变磁性液体的许多物理特性。磁性液体薄膜的折射率是否会随外加磁场作用的变化而变化值得研究。实验研究了磁性液体薄膜的折射率随外加磁场强度的变而变化。分析表明, 提出外加磁场改变了磁性液体颗粒链的大小, 改变了磁性颗粒链的大小

收稿日期: 2008-04-28; 收到修改稿日期: 2008-06-23

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (Y105469) 和浙江省科技攻关项目 (2007C21025) 资助课题。

作者简介: 陈善飞 (1968—), 女, 副研究员, 主要从事磁性流体的物理特性研究和开发应用。E-mail: wzlcsf@21cn.com

和入射光波波长的比值,从而改变了磁性液体的折射率的设想。初步建立起了磁性液体薄膜的折射率 and 外加磁场强度之间的关联式。从而可以揭示磁性液体薄膜的折射率 and 外加磁场强度之间的关系。因此,研究磁性液体薄膜折射率随外加磁场作用的变化而变化的特性,根据折射率的空间分布和时间变化,可以分析和确定其它多种物理场量。对研制磁光功能器件具有重要的实际意义。

2 实验装置

实验测量装置如图 1 所示。由以下四部分组成:1) 磁性液体薄膜;2) 产生可调节均匀大小磁场的恒稳电源和亥姆霍兹线圈;3) 实验单色光源的激光发生器;4) 测量磁性液体折射率的迈克尔孙干涉仪。

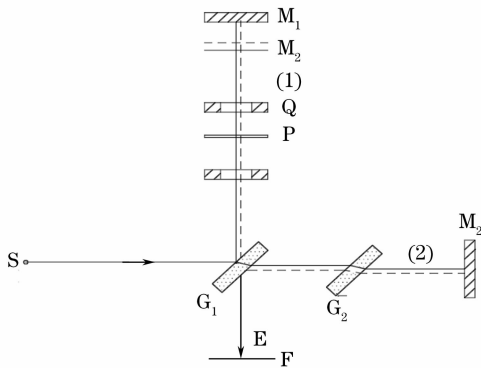


图 1 迈克尔孙干涉仪实验装置及光路图

Fig. 1 Experimental facility of michelson interferometer and beam path

要测定磁性液体薄膜的折射率随外加磁场的变化情况,关键在于磁性液体薄膜和亥姆霍兹线圈的设计与制作。

1) 磁性液体薄膜的制作:用两块 1 mm 厚度的玻璃片,中间夹有一厚度为 $6 \mu\text{m}$, 开有直径 40 mm 圆孔的透明 PET 聚脂薄膜,构建成一个 $6 \mu\text{m}$ 厚度的间隙,将含 Fe_3O_4 浓度为 10% 的水基磁性液体注入间隙,用不干胶密封。

2) 亥姆霍兹线圈是由直径为 0.2 mm 漆包线绕制而成,两个线圈都为 $\omega = 500$ 匝,半径 $R = 60$ mm,两个线圈距离 $L = 60$ mm。 μ_0 为真空中的磁导率。若恒流源输入 $I = 1.5$ A 的电流。则产生的磁感应强度

$$B = \frac{0.7155 \mu_0 \omega I}{R} \\ = \frac{0.7155 \times 500 \times 1.5 \times 4 \times 3.14 \times 10^{-7}}{60 \times 10^{-3}}$$

$$= 11.2 \text{ mT}. \quad (1)$$

实验时将磁性液体薄膜安置在霍姆线圈中间构建一个平台,将平台放置在迈克尔孙干涉仪导轨上面。转动粗动手轮或微动手轮可带动滑座,从而使反射镜 M_1 能前后移动,改变光程差,调出清晰的干涉环纹。

3 实验测量

由于磁性液体薄膜不能单独存在,必须由借助两块玻璃夹持,所以无法直接测量磁性液体薄膜与空气的相对折射率。为此本实验采用相对测量法测量^[6]。用同样的两块 1 mm 厚度的玻璃片,中间夹有一厚度为 $6 \mu\text{m}$, 开有直径 40 mm 圆孔的透明 PET 聚脂薄膜,构建成一个 $6 \mu\text{m}$ 厚度的间隙,间隙中是空气的为样品薄膜 1,是蒸馏水的为样品薄膜 2,是磁性液体的为样品薄膜 3。

将样品薄膜 1 如图 1 所示,放在迈克尔孙干涉仪的移动镜 M_1 和分光板 G_1 间,仔细调节迈克尔孙干涉仪微动手轮使屏 F 上设定的 BB' 和 CC' 区间有 4 条干涉条纹,记下 M_1 的位置读数 d_1 。在测量过程中为了消除误差,重复测量了三次,取平均值。

换上参照液体(蒸馏水)的样品薄膜 2,仔细调节迈克尔孙干涉仪微动手轮,使屏 F 上设定的 BB' 和 CC' 区间同样有 4 条干涉条纹,记下 M_1 的位置读数 d_2 。在测量过程中为了消除误差,重复测量了三次,取平均值。

换上待测的磁性液体样品薄膜 3,再仔细调节迈克尔孙干涉仪微动手轮,使 F 屏设定的上 BB' 和 CC' 区间同样有 4 条干涉条纹,记下 M_1 的位置读数 d_3 。在测量过程中为了消除误差,重复测量了三次,取平均值。

在亥姆霍兹线圈中输入不同的电流,测量磁性液体样品薄膜 3 在不同磁场强度下的干涉条纹,记下 M_1 的位置读数 d_3 。在测量过程中为了消除误差,在不同磁场强度下重复测量了三次,取平均值。

参照液体薄膜蒸馏水折射率 $n_2 = 1.3330$ mm, $d_2 = 2.5452$ 。空气折射率可近似为 $n_1 = 1$, $d_1 = 2.9253$ mm。得磁性液体的折射率为 n_3 :^[6]

$$n_3 = \left| \frac{d_3 - d_2}{d_2 - d_1} \right| (n_2 - n_1) + 1. \quad (2)$$

实验数据及处理见表 1 和图 2。表 1 中电流为 I (A),磁感应强度为 B (mT), M_1 的位置读数 d_3 (mm)。

表 1 磁性液体的磁场强度和折射率的关系
Table 1 Relation of refractive index and of magnetic field intensity of ferrofluid

I (A)	B (mT)	d_3 (mm)	n_3
0	1	2.0874	1.4011
0.2	0.89	2.0600	1.4251
0.4	1.79	2.0370	1.4452
0.6	2.68	2.0231	1.4574
0.8	3.58	2.0073	1.4712
1	4.48	1.9958	1.4813
1.2	6.96	1.9869	1.4891

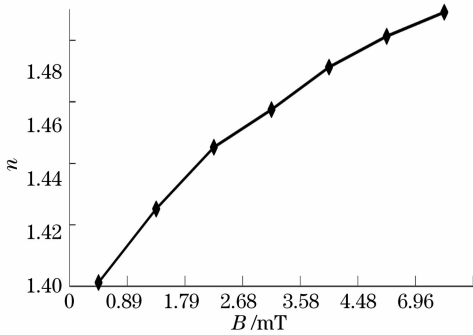


图 2 磁感应场强度和折射率的关系

Fig. 2 Relation of magnetic induction intensity and refractive index

4 结果分析和理论计算

磁性液体中悬浮着无数大小不等(10 nm 左右)的磁性微粒^[7~8]。光是电磁波,当电磁波射到这些微粒上时,电磁波就会发生位相和能量的变化。当磁性液体中微粒大小和入射电磁波波长之比值 r/λ 的数量级小于 $1/10$ 时,这种能量的变化状况叫做散射现象,当这个比值的数量级等于 1 时就叫做衍射现象。若这个数量级大于 10,这反射就开始了。从散射→衍射→反射之间的变化是连续的。磁性液体中的磁性微粒在外加磁场中产生移动或偏转并排列成磁性颗粒的链状,链的大小和方向随外加磁场强度的变化而变化,从而改变了磁性颗粒链的大小和入射光波波长的比值,改变了反射光能量,改变了磁性液体的折射率。这可能是磁性液体薄膜的折射率在外加磁场作用下发生变化的定性分析。

根据麦克斯韦的电磁场理论,光是某一波段的电磁波,光在真空中的传播速度 c 和在透明介质中的传播速度 u 分别为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3)$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (4)$$

式中 ϵ_0 , μ_r 分别是透明介质的相对介电常数和相对磁导率。真空中的光速 c 与介质中光速 u 的比值就是介质的折射率 n , 即

$$n = c/u, \quad (5)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \quad (6)$$

上式反映了介质的光学常数和电磁常数的相互关系。

磁性液体中的磁性颗粒 Fe_3O_4 是铁磁性物质, 则

$$B = \mu(H + M), \quad (7)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r}, \quad (8)$$

$$\mu_r = \frac{B}{B - M \mu_0}, \quad (9)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = \sqrt{\frac{\epsilon_r B}{B - M \mu_0}}, \quad (10)$$

式中 B 为磁感应强度, M 为磁化强度, μ_0 为真空中的磁导率, μ_r 为相对磁导率, ϵ_r 为电介质相对介电系数。这样初步建立起了磁性液体薄膜的折射率和外加磁场强度之间的关联式。

磁化强度 M 会随磁感应强度 B 的变化而变化, 如图 3 所示。磁性液体中的纳米磁性微粒属于超顺磁性物质, 磁性液体的磁化强度随外加磁场增加而增加, 最后达到饱和磁化状态, 此时, 所有的纳米磁性微粒的分子磁矩均按外磁场方向排列, 外磁场继续增加, 磁性液体的磁化强度不再增加^[9~10]。用振动样品磁强计可以测定磁性液体磁化强度 M 和磁感应强度 B 。

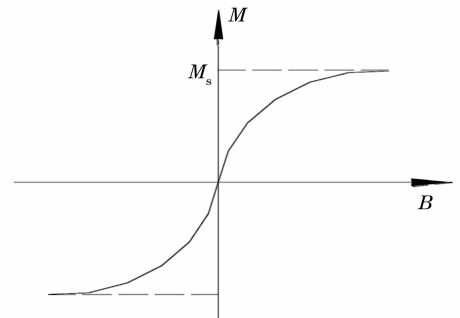


图 3 磁感液体的磁化曲线

Fig. 3 Magnetization curve of magnetic fluids

从关联式(10)可知, μ_0 , ϵ_r 都是常数, 外加磁场 B 可以改变磁性液体薄膜的折射率 n , 折射率的大小会随外加磁场强度增大而增大。但由于磁化强度、磁感应强度存在复杂的关系。而且, 这些物理参量在磁性液体制成薄膜可能又会发生变化, 故磁性液体薄膜的外加磁场强度和折射率之间的定量关

系还待更深入研究。

5 结 论

在迈克尔孙干涉仪上用对比测量法测量在不同外加磁场强度作用下磁性液体薄膜的折射率, 实验发现磁性液体薄膜的折射率随外加磁场强度的变化而变化。

提出了外加磁场改变了磁性液体颗粒链的大小, 改变了磁性颗粒链的大小和入射光波波长的比值, 从而改变了磁性液体的折射率的设想。

初步建立起了磁性液体薄膜的折射率和外加磁场强度之间的关联式。准确的数学建模还值得进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhengliang. Mechanism of optical birefringence effect on a thin film magnetic fluid situated in a magnetic field[J]. *Acta Arrnamentarl*, 2004, **25**(3): 28~31
王正良. 磁性液体薄膜在磁场中的光学双折射效应的机理研究[J]. *兵工学报*, 2004, **25**(3): 28~31
- 2 Ding Wanshan, Liu Ya. Optical measurement of object's surface three-dimensional shape in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **1**(1): 58~62
丁万山, 刘 艳. 水中物体的光学三维形貌测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **1**(1): 58~62
- 3 Li Xuebin, Xu Qingshan, Hu Huanling. New method to deduce imaginary part of refractive index of aerosol with double-scattering angles laser optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **3**(3): 391~394
李学彬, 徐青山, 胡欢林. 双散射角光学粒子计数器测量气溶胶折射率的新方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **3**(3): 391~394
- 4 Yang Jianjun, Zhou Jingli, Wang Keyi *et al.*. Influence of silver-doped nanoparticles on photo-induced isomerization of azo polymer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 119~123
杨建军, 周京利, 王克逸等. 掺杂 Ag 纳米粒子对偶氮聚合物光致异构效应的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 119~123
- 5 Hua Shiqun, Liu Ying, Hong Yun. Measurement of refractive index of liquid by the equal thickness interference [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1542~1546
花世群, 骆 英, 洪 英. 基于等厚干涉原理的液体折射率测量方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1542~1546
- 6 Chen shuqing. The method of michelson's interferometer equal inclination frings measure the refractive index fluid[J]. *Guangxi Wuli*, 2003, **1**: 28~29
陈淑青. 迈克尔孙干涉仪等倾干涉条纹法测液体折射率[J]. *广西物理*, 2003, **1**: 28~29
- 7 Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 67~71
张 娜, 冯 霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 67~71
- 8 Xia Changliang, Yu Wei, Li Bin *et al.*. FEM analyses on acoustic streaming field and saturated flow velocity of ultrasonic motor driving fluid directly[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, **26**(18): 143~147
夏长亮, 俞 卫, 李 斌等. 基于有限元法的液体介质超声波电机内部声流场分析及饱和流速研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, **26**(18): 143~147
- 9 Si Hu, Li Xiaohong. Fluid dynamics theory for magnetorheological fluids[J]. *Function Materials*, 2006, **5**: 725~732
司 鹤, 李晓红. 磁流变液的流体动力学理论[J]. *功能材料*, 2006, **5**: 725~732
- 10 Wang Zhengliang. create an overweight weightlessness and microgravity environment wigh magnetic fluids on the ground-based [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, **25**(2): 179~182
王正良. 在地面上用磁性液体制造流体超重, 失重和微重力环境[J]. *宇航学报*, 2004, **25**(2): 179~182