

# 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器

祖 鹏<sup>1,2</sup> 向望华<sup>1,2</sup> 白扬博<sup>1,2</sup> 金永兴<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; <sup>2</sup>光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)  
<sup>3</sup>School of Chemical and Biomedical Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 637598)

**摘要** 提出一种使用磁性液体的新型光纤 Sagnac 磁场传感器。磁性液体具有磁致可变双折射效应和二向色性, 在外加磁场作用下, 液体中的磁性纳米粒子沿磁场方向结链规则排列, 形成各向异性。将其制成液体薄膜, 放入具有一段保偏光纤的 Sagnac 环中, 使光纤 Sagnac 干涉仪的正弦形状干涉光谱可随外加磁场变化。光纤中传输光垂直经过磁性液体薄膜, 在外加磁场与磁性液体薄膜平面平行时, 传输光产生双折射现象, 干涉光谱的峰值波长随着外加磁场的变化而变化。传感器灵敏度与磁性液体薄膜厚度有关, 对于 60  $\mu\text{m}$  的磁性液体薄膜, 灵敏度为 16.7 pm/Oe (1 Oe $\approx$ 79.578 A/m), 分辨率为 0.60 Oe。而在外加磁场与磁性液体平面垂直时, 干涉光谱的峰值波长几乎不随外加磁场的变化而变化。

**关键词** 光纤光学; 光纤磁场传感器; Sagnac 干涉仪; 磁性液体; 磁光效应; 双折射

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0806005

## A Novel Fiber Sagnac Magnetic Field Sensor Based on Magnetic Fluid

Zu Peng<sup>1,2</sup> Xiang Wanghua<sup>1,2</sup> Bai Yangbo<sup>1,2</sup> Jin Yongxing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>3</sup>School of Chemical and Biomedical Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 637598

**Abstract** An optical fiber Sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid is proposed. The magnetic fluid exhibits magneto-optic birefringence under external magnetic field, in which the nanoparticles form chains along the magnetic field and cause the anisotropy. The interference spectrum of the sensor shifts with the external magnetic field due to the magnetic fluid film inserted in the Sagnac loop together with a section of polarization maintaining fiber. The output spectrum shifts with the variation of magnetic field strength when the plane of the magnetic fluid is perpendicular to the direction of the light and parallel to the direction of the external magnetic field. The achieved sensitivity and resolution of the sensor, which are related to the thickness of the magnetic film, are 16.7 pm/Oe (1 Oe $\approx$ 79.578 A/m) and 0.60 Oe for 60  $\mu\text{m}$  thickness, respectively. When the plane of the magnetic fluid is perpendicular to the direction of the magnetic field, the output spectrum does not shift with the variation of the magnetic field strength.

**Key words** fiber optics; optical fiber magnetic field sensor; Sagnac interferometer; magnetic fluid; magneto-optic effect; birefringence

**OCIS codes** 060.2370; 160.3820; 120.3180; 280.4788

## 1 引 言

磁光传感器具有测量分辨率高、精度高以及不易受环境干扰等优点<sup>[1]</sup>。磁光传感器的基本原理是

磁场与在磁光材料中传输的光发生直接或者间接的相互作用, 从而改变光的参数, 包括光的强度、波长和偏振态等。磁光材料是磁光传感器的关键组成部

**收稿日期:** 2011-03-09; **收到修改稿日期:** 2011-06-10

**作者简介:** 祖 鹏(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤传感器、光纤传感器、光纤光栅和磁场传感器等方面的研究。E-mail: xiaohaozi0716@hotmail.com

**导师简介:** 向望华(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤技术与光通信、超快激光等方面的研究。E-mail: whxiang@tju.edu.cn(通信联系人)

分。常见的磁光材料有法拉第旋光材料、磁光克尔效应材料和磁致伸缩材料等。近年来,出现了一种新型磁光材料——磁性液体,它具有磁致光学双折射特性<sup>[2~4]</sup>、法拉第效应<sup>[5]</sup>、场致透射特性<sup>[6]</sup>和磁致可变折射率<sup>[7~9]</sup>等,在磁光器件尤其是磁光传感器上得到了广泛的应用<sup>[10,11]</sup>。利用磁性液体的磁致可变折射率现象,将磁性液体放入法布里-珀罗干涉仪(FPI)的干涉腔中,改变传输光的相位,可以实现磁场传感<sup>[12]</sup>。磁性液体的磁致可变折射率性质也被应用在了马赫-曾德尔干涉仪(MZI)中,将磁性液体放在空间光 MZI 的传感臂中,可以改变光的相位实现磁场传感<sup>[7]</sup>;将其用作多模光纤 MZI 的传感臂的包层,可以观察到干涉仪的输出光强变化,实现光强调制<sup>[8]</sup>。在这些应用中,都使用了光学干涉仪。使用干涉仪的磁场传感器,优点是具有高分辨率和高灵敏度,而缺点是制作高性能 FPI 和 MZI 过程中会遇到匹配传感臂与干涉臂光纤长度、平衡传感臂与干涉臂的光强以及保证光程差小于光源相干长度等问题,制作加工难度非常大。还有将磁性液体的磁致可变折射率特性与长周期光纤光栅结合来实现磁场传感的报道<sup>[13~15]</sup>,然而磁性液体的折射率会随外界温度和其自身浓度的变化而变化,因此其折射率需要精确地选择和设计。除此之外,也有利用磁性液体的场致透射率变化特性的温度传感器<sup>[6]</sup>,以及利用磁性液体薄膜的热透镜效应的高压电流传感器<sup>[16]</sup>。

虽然出现了众多利用磁性液体各种磁光特性的传感器,但是还没有关于利用磁性液体的双折射特性设计的传感器的报道。本文提出一种利用磁性液体的磁致光学双折射效应和二向色性的新型磁场传感器。使用 Sagnac 干涉仪结构,两束参与干涉的干涉光在完全相同的光路中传输,既利用了干涉仪高灵敏度的优点也避免了匹配两束光的光程差和平衡两束光的光强等问题,使传感器更容易制作。在光传播方向与外加磁场方向垂直时,对于厚度为 20 和 60  $\mu\text{m}$  的磁性液体薄膜,测得传感器灵敏度分别为 11.4 和 16.7 pm/Oe (1 Oe  $\approx$  79.578 A/m),分辨率分别为 0.88 和 0.60 Oe;在磁性液体平面与磁场方向垂直时,传感器输出光谱几乎不变。

## 2 传感器结构和实验原理

在外磁场作用下,磁性液体中磁性纳米粒子沿磁场方向排列,引起光学各向异性<sup>[4,14]</sup>。如果外加磁场与光传播方向垂直,由于存在磁光双折射效应,

光波在磁性液体中传输会分成偏振面垂直于磁场的 o 光和偏振面平行于磁场的 e 光;同时,由于二向色性的作用,磁性液体对 o 光和 e 光具有不同的吸收系数。如果外加磁场与光传播方向平行,磁光双折射效应和二向色性很弱,磁性液体的磁光效应主要表现为法拉第效应。在本实验中,传感器工作原理主要依靠磁性液体的磁光双折射性质,同时二向色性、法拉第效应都在不同程度上影响传感器性能。

所设计的光纤磁场传感器的结构是一个光纤 Sagnac 干涉仪,如图 1 所示。Sagnac 环中有一段保偏光纤(PMF),将磁性液体夹在两片光学薄玻璃片之间制成薄膜插入到 Sagnac 环中的一对光纤准直器中间,薄膜平面的方向与传输光的方向垂直,与所施加的磁场方向平行。在光纤 Sagnac 干涉仪中,宽带光源发出的光经过 3 dB 单模光纤耦合器分成两束沿相反方向传输的光,在经过保偏光纤和透过磁性液体之后,在 3 dB 耦合器处再次相遇并发生干涉。

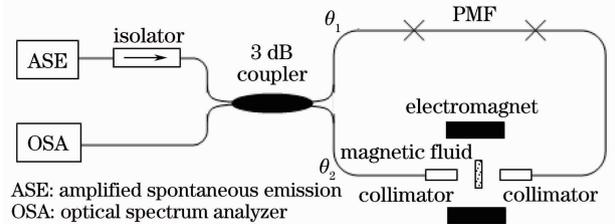


图 1 基于磁性液体的光纤磁场传感器原理图  
Fig. 1 Scheme of optical fiber magnetic field sensor based on magnetic fluid film

用琼斯矩阵法对 Sagnac 干涉仪进行分析,磁性液体薄膜的琼斯矩阵  $\mathbf{J}$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$\mathbf{J} = \exp\left(-\frac{\alpha_o + \alpha_e}{2}\right) d \times \begin{bmatrix} \exp\left(i\frac{\varphi_m}{2} + \alpha d\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\frac{\varphi_m}{2} - \alpha d\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

矩阵中,实部代表传输光的损耗,虚部代表相位变化。 $\varphi_m$  是由于磁性液体的双折射特性引入的相位差,  $\varphi_m = 2\pi B_m d / \lambda$ ,  $B_m$  是磁性液体的双折射,  $\alpha_e$  和  $\alpha_o$  分别是磁性液体对 e 光和 o 光的吸收系数,  $\lambda$  是光的波长,  $d$  为磁性液体薄膜的厚度,  $\alpha = -(\alpha_o - \alpha_e) / 2$ 。如图 1 所示,将磁性液体薄膜与保偏光纤看做一个整体,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  为入射光和出射光与偏振轴之间的等效夹角,则顺时针方向和逆时针方向的琼斯矩阵  $\mathbf{J}_{cw}$  和  $\mathbf{J}_{ccw}$  分别为<sup>[18]</sup>

$$\mathbf{J}_{\text{CW}} = \exp\left(-\frac{\alpha_o + \alpha_e}{2}d\right) \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp\left(i\frac{\varphi}{2} + ad\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\frac{\varphi}{2} - ad\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_{\text{CCW}} = \exp\left(-\frac{\alpha_o + \alpha_e}{2}d\right) \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp\left(i\frac{\varphi}{2} + ad\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\frac{\varphi}{2} - ad\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

图 1 中干涉仪输出光的电场强度矢量  $\mathbf{E}_{\text{out}}$  可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \frac{1}{2}(\mathbf{J}_{\text{CW}} - \mathbf{J}_{\text{CCW}})\mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (4)$$

其中  $\mathbf{E}_{\text{in}}$  是输入光的电场强度矢量, 干涉仪的透射率  $T = \mathbf{E}_{\text{out}}^* \mathbf{E}_{\text{out}} / (\mathbf{E}_{\text{in}}^* \mathbf{E}_{\text{in}})$ <sup>[18]</sup>, 得到 Sagnac 干涉仪的相对透射率  $T$  可以表示为

$$T = \frac{1}{2} \exp[-(\alpha_o + \alpha_e)d] \sin^2(\theta_1 + \theta_2) [\cosh(2ad) - \cos \varphi], \quad (5)$$

式中总相位差  $\varphi = 2\pi BL/\lambda$ ,  $B$  是双折射,  $L$  是等效长度, 由保偏光纤的长度、磁性液体薄膜的厚度以及保偏光纤和磁性液体薄膜偏振轴之间的夹角决定。  $B$  包括保偏光纤的双折射  $B_0$  和由磁性液体薄膜的双折射  $B_m$ 。  $B_0$  由所使用的保偏光纤决定, 是一个常数, 在传感过程中保偏光纤长度不会改变, 因此由保偏光纤引起的相位差为常数。  $B_m$  由磁性液体决定, 是一个变量, 随着磁场的变化而变化。由于  $B_m$  的值本身很小, 在光源的光谱范围和光谱仪的测量范围内测量不到  $B_m$ , 因此才在 Sagnac 环中使用一段保偏光纤, 来引入初始的双折射  $B_0$  作为偏置。

Sagnac 干涉仪的透射谱  $T$  可以近似认为是波长  $\lambda$  的周期函数,  $T$  的周期和峰值波长由  $[\cosh(2ad) - \cos(2\pi BL/\lambda)]$  项决定, 其中  $\alpha$  和  $B$  都是磁场强度的函数, 因此传感器的峰值波长随磁场强度变化而变化;  $T$  的幅度, 也就是干涉条纹的对比度, 由  $\sin^2(\theta_1 + \theta_2)$  项和  $\exp[-(\alpha_o + \alpha_e)d]$  项决定, 其中第 2 项的损耗由磁性液体的二向色性造成, 第 1 项由光的偏振态决定, 同时磁液的二向色性也会影响到光的偏振态, 因此磁性液体的二向色性是影响干涉光谱的幅度(条纹可见度)的主要原因。

### 3 实验和结果

将质量分数为 3.9% 的磁性液体 (EMG605-Ferrotec) 滴在 10 mm × 10 mm 的光学玻璃片上, 用另一片光学玻璃片将液滴盖上, 并用紫外 (UV) 胶将边缘封好, 以防止玻璃片脱落。磁性液滴夹在两片薄玻璃片中间制成两个厚度分别为 20 和 60  $\mu\text{m}$

的暗褐色半透明薄膜样品, 放置在光路中, 并将其置于外加磁场中。外加磁场由一个电磁铁来提供 (EM4-HVA, LakeShore), 磁场大小用高斯计来测量 (Model 425, LakeShore)。所使用的保偏光纤 (PM-1550-HP, Thorlabs) 长度为 50 cm, 双折射大小为  $3.3 \times 10^{-4}$ 。使用熔接机将保偏光纤与单模光纤熔接形成 Sagnac 环, 熔接损耗 -4 dB。所有的光纤器件, 包括 3 dB 宽带耦合器、准直器、偏振无关隔离器, 中心波长都是 1550 nm。实验室环境温度为 23.7  $^{\circ}\text{C}$ 。

从放大自发辐射宽带光源 (ASE) 发出的光经过隔离器, 进入传感器的输入端。传感器的输出光谱用光谱仪 (OSA, AQ6370) 来观察并记录。在无外界磁场条件下, 初始的正弦干涉光谱图如图 2 中标注“0”的曲线所示, 消光比超过 30 dB。分别在磁性液体薄膜平面与外磁场方向平行和垂直的情况下测试传感器的性能。

#### 3.1 磁场方向平行于磁性液体薄膜平面

将磁场方向设置成平行于磁性液体薄膜平面, 改变施加磁场的强度, 将输出光谱记录下来。如图 2 所示, 对于厚度为 20  $\mu\text{m}$  的磁性液体薄膜样品, 当磁场强度从 0 增加到 2000 Oe 时, 传输谱的干涉峰从 1551.7 nm 移动到 1553.3 nm, 移动了 1.6 nm, 同时干涉光谱的消光比也下降到 10 dB。消光比下降主要是由于磁性液体存在二向色性, 导致不同偏振方向的光传输损耗不同, 进而影响消光比。

厚度为 20 和 60  $\mu\text{m}$  的磁性液体薄膜在外磁场作用下, 峰值波长随磁场强度变化关系具有相同的趋

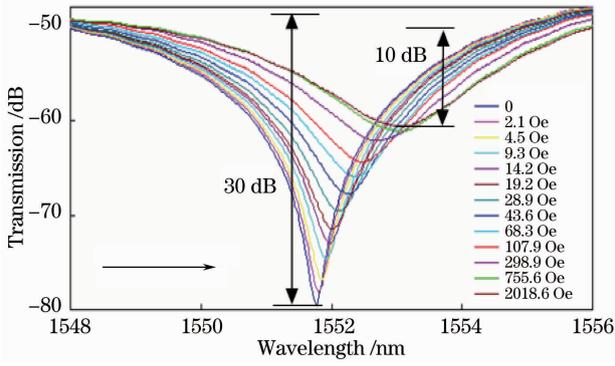


图 2 在不同磁场强度下测量的传感器输出光谱  
Fig. 2 Measured transmission spectra of the sensor under different magnetic field strengths

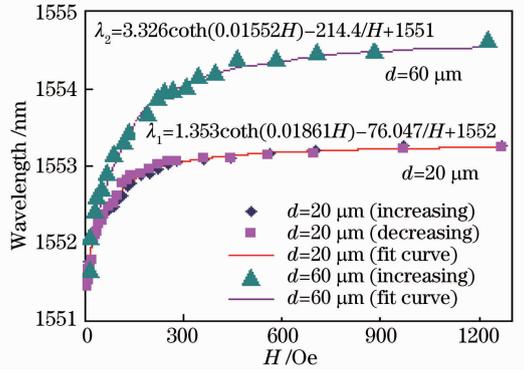


图 3 传输光谱峰值波长随磁场强度变化曲线  
Fig. 3 Dip wavelength in the transmission spectrum against magnetic field strength

势,如图 3 所示。当磁场强度比较小时(磁场强度小于 200 Oe),传输光谱的峰值波长随磁场增加快速增大,几乎成线性关系;当磁场强度继续增大时,传输光谱的峰值波长变化减慢(磁场强度在 200~300 Oe 之间);当磁场强度大到一定程度时,传输光谱的峰值波长移动趋于饱和,几乎不随磁场的增加而增加。在 0~180 Oe 范围内,对数据点进行线性拟合,对于厚度为 20 和 60  $\mu\text{m}$  的磁性液体薄膜样品,得到传感器灵敏度分别为 11.4 和 16.7  $\text{pm}/\text{Oe}$ ;考虑到光谱仪的最小分辨率为 10  $\text{pm}$ ,可以估算传感器的分辨率分别为 0.88 和 0.60 Oe。在 0~2000 Oe 的范围内用改进的 Langevin 函数对数据进行拟合,得到  $R^2$  值分别为 0.9949 和 0.9886。

随磁场强度的变化关系如图 3 所示。可以看到磁场增加过程的峰值波长变化曲线和减小过程的峰值变化曲线完全重合,说明磁性液体本身没有磁滞效应。

### 3.2 磁场方向垂直于磁性液体薄膜平面

将磁场方向设置成垂直磁性液体薄膜平面,根据前面的分析,光波经过磁性液体不会产生双折射现象。将磁场强度从 0 增加到 2000 Oe,传感器输出的光谱如图 4 所示。在磁场增加的过程中,传输光谱几乎不变,干涉光谱的消光比略有下降[图 4(a)]。消光比下降的原因是,当光传播方向与磁场方向平行时,磁性液体存在着法拉第效应。但是因为磁性液体的厚度一般仅有几十微米,磁性液体所造成的光的偏振面旋转也很小,因此干涉光谱的消光比变化很小。干涉光谱的峰值波长移动也非常小[图 4(b)],可以忽略不计。

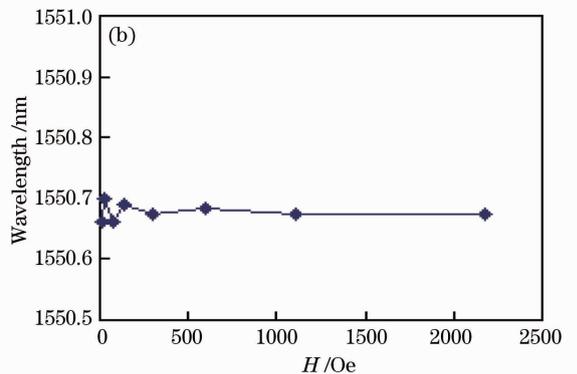
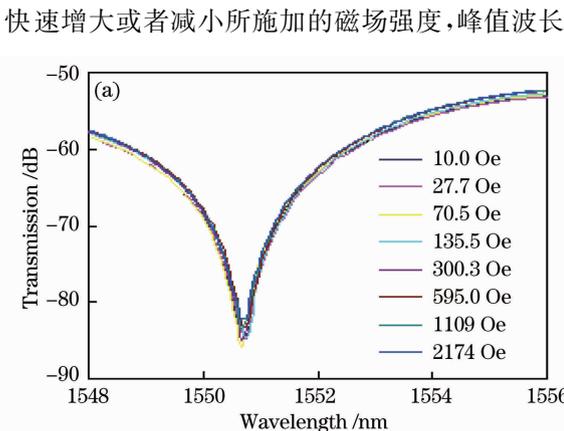


图 4 磁场方向垂直于磁性液体薄膜平面时(a)在不同磁场强度下的输出光谱;(b)输出光谱的峰值波长随磁场强度变化关系  
Fig. 4 In the case of the direction of magnetic field is perpendicular to the plane of magnetic fluid film, (a) transmission spectra under different external magnetic field strengths; (b) dip wavelength shift

## 4 结 论

提出了一个基于 Sagnac 干涉仪的光纤磁场传感器,传感器中利用了磁性液体的磁致可变双折射

效应和二向色性,并做出了理论分析和实验验证。设计的传感器可以测量磁场强度的大小,当磁场方向平行于磁性液体薄膜平面时,传感器输出光谱

(峰值波长)随着磁场的增加而移动,变化趋势符合改进的 Langevin 函数,并具有非常好的重复性。在线性测量  $0 \sim 180$  Oe 范围内,对于厚度为 20 和  $60 \mu\text{m}$  的磁性液体薄膜样品,得到传感器灵敏度分别为 11.4 和 16.7 pm/Oe,分辨率分别为 0.88 和 0.60 Oe;当磁场方向垂直于磁性液体薄膜平面时,传感器输出光谱几乎不随磁场的增加而移动。利用磁性液体可变折射率的 FPI 电流传感器,其灵敏度为  $1.5 \text{ pm/Oe}^{[12]}$ ;利用磁性液体的可变折射率与长周期光纤光栅结合的滤波器,其调谐灵敏度为  $4.4 \text{ pm/Oe}^{[14]}$ ;本传感器的灵敏度比以上两个传感器的灵敏度高一个数量级。另外,本传感器采用 Sagnac 干涉仪结构,与光纤 MZI 和光纤 FPI 相比,参与干涉的两束光在完全相同的光路中传输,因此两束光经历相同的损耗,避免了匹配光纤长度和平衡光束强度的困难。

本文仅仅演示了在  $0 \sim 2000$  Oe 的磁场强度范围内的静磁场测量。基于本传感器结构,可以进一步设计磁光调制器、磁光开关以及磁光衰减器等。在本传感器结构中使用了准直器、磁性液体薄膜等空间光学器件,这些器件可以进一步发展成类似光纤隔离器和光纤环形器的集成光纤器件。本传感器也有潜力发展成为全光纤结构的磁场传感器。

### 参 考 文 献

- 1 F. Cecelja, W. Balachandran. Optimized CdTe sensors for measurement of electric and magnetic fields in the near-field region [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(3): 483~487
- 2 Z. Y. Di, X. F. Chen, S. L. Pu *et al.*. Magnetic-field-induced birefringence and particle agglomeration in magnetic fluids[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(21): 211106
- 3 Pan Xueli, Pan Yingtian. Charactersitics of magneto fluid and its applitation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1725~1729  
潘学礼,潘应天. 磁流体磁光特性的研究及其应用[J]. *光学学报*, 1996, **16**(12): 1725~1729
- 4 Lu Zhangxian, Wang Jun, Xia Sihua. Study on optical properties of kerosene-based  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic liquid film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0216003  
陆樟献,王 军,夏肆华. 煤油基  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性液体薄层的光学特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0216003
- 5 N. A. Yusuf, H. Abusafia, I. Abualjarayesh *et al.*. Temperature-dependence of the Faraday-rotation and the

- transmission of light in magnetic fluids[J]. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 1990, **85**(1): 85~88
- 6 D. Zhang, Z. Di, Y. Zou *et al.*. Temperature sensor using ferrofluid thin film[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, **7**(1): 141~144
- 7 C. Y. Hong, S. Y. Yang, K. L. Fang *et al.*. Mach-Zehnder interferometer by utilizing phase modulation of transmitted light through magnetic fluid films possessing tunable refractive index [J]. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, **297**(2): 71~75
- 8 J. Chieh, C. Hong, S. Yang *et al.*. Study on magnetic fluid optical fiber devices for optical logic operations by characteristics of superparamagnetic nanoparticles and magnetic fluids[J]. *J. Nanoparticle Research*, 2010, **12**(1): 293~300
- 9 Lu Zhangxian, Chen Shanfei, Wang Zhengliang. Magnetic field and current sensing by reflection on fiber-optic end face in ferrofluids[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1482~1486  
陆樟献,陈善飞,王正良. 基于磁性液体中光纤端面反射的磁场和电流传感[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1482~1486
- 10 Zhao Yong, Dong Junliang, Chen Jingjing *et al.*. Optical properties of the magnetic fluid and its application in optical information technology and sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(7): 126~131  
赵 勇,董俊良,陈菁菁 等. 磁流体的光学特性及其在光电信息传感领域中的应用[J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 126~131
- 11 Lu Zhangxian, Chen Shanfei, Chen Jianping. A study of the optical measurements of high-voltage current using magnetic fluid films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1049~1051  
陆樟献,陈善飞,陈建萍. 磁性流体薄片高电压电流光学测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1049~1051
- 12 Tao Hu, Yong Zhao, Xing Li *et al.*. Novel optical fiber current sensor based on magnetic fluid[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 392~394
- 13 Chen Shanfei, Wang Zhengliang, Lu Zhangxian. The refractive index change of ferrofluid film under external magnetic field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 273~276  
陈善飞,王正良,陆樟献. 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[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 273~276
- 14 T. Liu, X. Chen, Z. Di *et al.*. Tunable magneto-optical wavelength filter of long-period fiber grating with magnetic fluids [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **91**(12): 121116
- 15 A. Candiani, M. Konstantaki, S. Pissadakis. Magnetic tuning of optical fibre long period gratings[C]. CLEO Europe-EQEC, 2009, CH4\_2
- 16 S. H. Yuan, X. W. Chen. A new electric current sensor by thermal lens coupled magneto-optical effect in ferrofluid [C]. *SPIE*, 1996, **2895**: 8~10
- 17 S. L. Pu, M. Dai, G. Q. Sun *et al.*. Linear birefringence and linear dichroism coupled optical anisotropy of magnetic fluids by external magnetic fields[C]. The International Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2009, 5230096
- 18 I. Golub, E. Simova.  $\pi$ -shifted Sagnac interferometer for characterization of femtosecond first- and second-order polarization mode dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(19): 1681~1683