

基于磁性液体中光纤端面反射的磁场和电流传感

陆樟献 陈善飞 王正良

(浙江万里学院应用物理研究所, 浙江 宁波 315101)

摘要 理论分析和数值模拟计算了不同温度和不同体积密度下磁性液体的折射系数和消光系数,以及浸没在磁性液体中光纤端面处的反射率,得到了体积密度和外加磁场强度对磁性液体的折射系数和消光系数的作用比较大,而温度对折射系数和消光系数的影响不大。实验制作了光纤端面浸没在磁性液体中的传感元件,设计了测量光路系统,得到了反射率随外加磁场强度变化的情况,与理论分析结果相吻合。由理论和实验可知,磁性液体的消光系数不仅跟体积密度和温度有关,还与外加磁场强度有关,对光纤端面处的反射率有一定的影响。

关键词 导波光学; 传感技术; 磁性液体; 消光系数

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1482

Magnetic Field and Current Sensing by Reflection on Fiber-Optic End Face in Ferrofluids

Lu Zhangxian Chen Shanfei Wang Zhengliang

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

Abstract The refractive coefficient and extinction coefficient of ferrofluids, and the reflectivity on the fiber-optic end face in ferrofluids versus external magnetic field intensity at different volume concentrations and temperatures were theoretically analyzed and numerically simulated. The results show that volume concentration and magnetic field intensity have a great impact on refractive coefficients and extinction coefficients of ferrofluids. The sensing heads based on the reflection on the fiber-optic end face in ferrofluids were fabricated, and the optical measurement system was designed, so the relationship between reflectivity and magnetic field intensity was obtained. The experimental results agree with the theoretical analysis. By theory and experiment, the effect of extinction coefficient of ferrofluids on the reflectivity on the fiber-optic end face can not be neglected.

Key words guided wave optics; transducer technique; ferrofluid; extinction coefficient

1 引 言

磁性液体是一种稳定的胶体,是利用表面活性剂将 10nm 左右的磁性颗粒均匀分散在基液中制成的悬浮液。由于磁性液体中的磁颗粒状态受外磁场的影响,所以磁性液体具有非凡的磁光效应^[1~8]。利用磁性液体作为构成成分的光纤磁场、电流传感器以及磁光双稳、调制器件等器件已有一定研究,取得了良好的效果^[9~12]。目前在磁性液体的磁场和电流传感应用方面,主要是基于透过磁性液体薄片的光强随磁场的变化关系^[9,10]设计的。磁性液体的

透射率比较低,薄片的厚度很薄,造成传感元件制作上的困难。基于光纤端面菲涅耳反射原理的传感器应用^[13,14]比较广泛,本文利用浸没在磁性液体中的光纤与磁性液体的分界面反射率随外加磁场变化的关系设计磁场和电流传感,系统结构将变得更为简单,安装方便。基于振荡磁偶极子模型对磁性液体的折射系数和消光系数与体积密度、温度和磁场强度等之间的关系进行数值计算,设计了简单的磁场测量系统并进行了实验。

收稿日期: 2008-11-04; **收到修改稿日期**: 2008-12-31

基金项目: 浙江省科技厅科研工业项目(2007C21025)和宁波市自然科学基金(2008A610064)资助课题。

作者简介: 陆樟献(1973—),讲师,主要从事集成光学、光纤传感和磁性液体等方面的研究。

2 原 理

当外加磁场强度为零时,磁性颗粒均匀地弥散在基液中,随着磁场强度的不断增强,磁性颗粒将聚集形成一条条磁链,磁性液体的光学性质从而发生变化。根据 M. Xu 等^[5]磁偶极模型,当光传播方向与磁场方向平行时,磁性液体的复折射系数为

$$\tilde{n}^2 = n_1^2 \left\{ 1 + N \left[\alpha_{\perp} + (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \left(\frac{2}{x} \coth x - \frac{2}{x^2} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 n_1 为磁性液体的基液的折射系数, N 为单位体积的磁性颗粒数, α_{\parallel} 和 α_{\perp} 分别为颗粒对的对称轴相对光场平行和垂直时的极化张量, $x = 2\mu H / (KT)$, H 为磁场强度, K 为波尔兹曼常量, T 为温度, μ 为磁导率。

(1) 式中磁性液体的复折射系数是磁场强度和温度的函数。令 $\tilde{n} = n + ik$, $\tilde{n}^2 = a + bi$, 则磁性液体的复折射系数的实部和虚部分别为

$$n = \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}}, \quad (2)$$

$$k = \frac{b}{2n},$$

当光在浸没在磁性液体中的光纤传播时,因为光纤与磁性液体的折射系数不同,所以在光纤端面将有部分光反射,光在单模光纤的端面的反射角可近似为零。设单模光纤的折射系数为 n_{fc} , 根据菲涅耳公式可得能流反射率

$$R = \frac{(n_{fc} - n)^2 + k^2}{(n_{fc} + n)^2 + k^2}. \quad (3)$$

由于(3)式中的 n 和 k 为磁场强度、温度以及磁性液体浓度的函数,所以通过测量反射率可以得到磁场强度、温度和磁性液体浓度等物理量,如果知道磁场强度与产生的电流强度之间的关系,则可以得出电流强度。

3 实 验

3.1 传感元件的制作

采用化学共沉淀法制备成不同浓度的水基磁性液体^[8],把它放入传感单元的小容器里,容器的材料和形状可以根据具体要求选择和制作,在实验中选用小玻璃管。在塑料盖子上打一小眼,单模光纤穿过小眼后,用光纤切割机切割光纤,然后往回拉,当光纤端面离盖子还有 1 cm 左右时,用胶把小眼封住,固定光纤。最后盖上盖子,使光纤端面浸没在磁性液体中,这样就做成了传感元件,如图 1 所示。

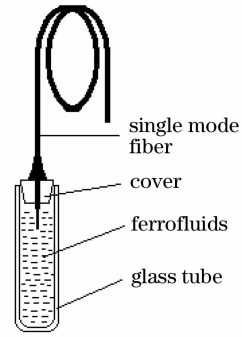


图 1 传感头的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensing head

3.2 测量光路系统和反射率计算的校准

实验装置如图 2 所示,波长 1557 nm 的半导体激光器经 3 dB 光纤耦合器进入传感头,传感元件放在螺旋线圈中间,螺旋线圈的电流由计算机进行控制,线圈内的磁场强度与电流强度之间的关系在实验前用高斯计(STM-3100 型号)进行标定,磁场强度 H 与线圈中电流 I 的关系为 $H = 6.4 \times 10^4 I$,其中电流可调范围为 0~3 A,精度为 1 mA。

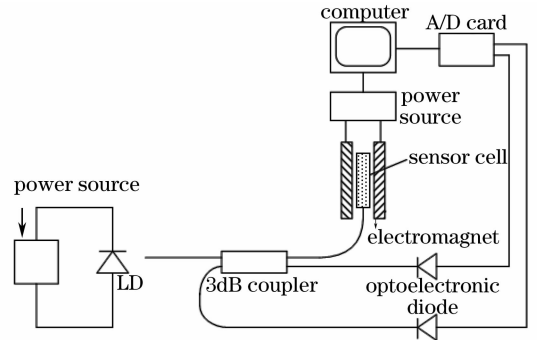


图 2 测量光路系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical measurement system

为了降低光源波动引起的测量误差,3 dB 光纤耦合器的一端光纤耦合到光电二极管,经过电路放大,通过 16 位模/数(A/D)数据采集卡输入计算机,从而进行实时监控和对数值的校正。同时为了减除光纤耦合器、光纤、光纤焊接点以及参考光路端面等方面引起的本征光和反射光对反射光的影响,在把测量光纤端面放进磁性液体前,先放进匹配液进行校正。假设放进匹配液时,参考光路和测量光路的光功率为 P'_{ref} 和 P'_{meas} ;放进磁性液体后,参考光路和测量光路的光功率为 P_{ref} 和 P_{meas} ,则在测量的光纤端面的反射率为

$$R = \left(P_{meas} - \frac{P_{ref}}{P'_{ref}} P'_{meas} \right) / \left[\frac{(n_{fc} + n_{air})^2}{4n_{fc} n_{air}} P_{ref} \right]. \quad (4)$$

4 数值计算和实验结果分析

4.1 数值计算

图 3 给出不同体积密度 C 和温度条件下的磁性液体折射系数 n 和磁场强度 H 之间的关系曲线。可见,在相同温度和磁场强度下,随着磁性颗粒体积分

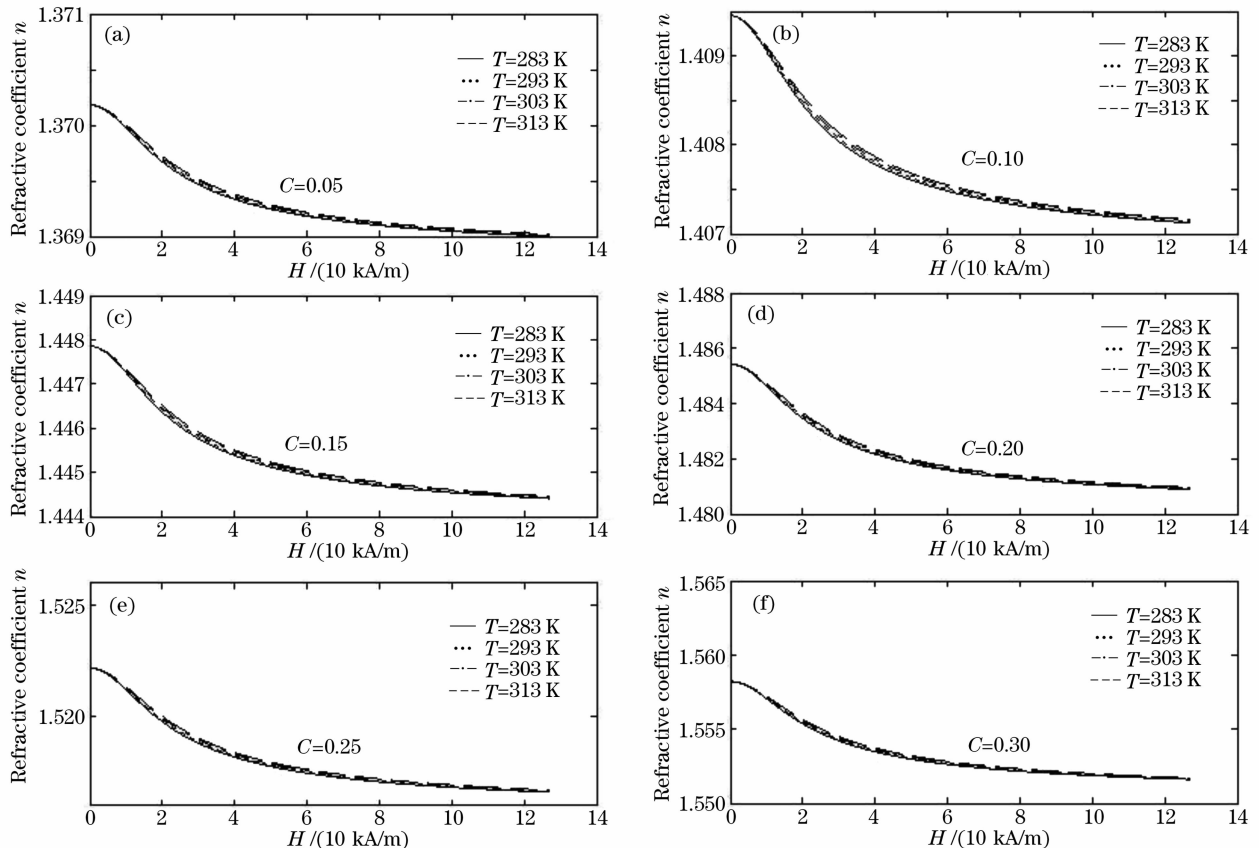


图 3 不同体积密度 C 和不同温度 T 条件下磁性液体的折射系数 n 与磁场强度 H 的关系曲线

Fig. 3 Refractive coefficient n of ferrofluids versus magnetic field intensity at different volume concentrations and temperatures

根据数值计算可见,磁性液体的消光系数不仅是光波长的函数^[15],其消光系数随着磁场强度的增大而增大,且随着体积密度的增大而变大,如图 4 所示。因此浸没在磁性液体的光纤端面的反射率除了与磁性液体的折射系数有关外,还受磁性液体的消光系数的影响。

由于磁性液体的折射系数和消光系数都与磁场强度和体积密度有关,所以浸没在磁性液体的光纤端面的反射率与磁场强度的关系比较复杂。从图 5 可见,对有些磁性液体,光纤端面的反射率随磁场强度的增大而增大,如图 5(a)和图 5(b),有些光纤端面的反射率随磁场强度的增大而减弱,如图 5(c)~图 5(f)。

4.2 实验结果分析

图 6 是在 $T=293$ K 下两种体积密度的光纤端面反射率的理论和实验曲线图。图 6(a)的反射率

度的增大,磁性液体折射率随着增大,而温度的影响非常小。同时,磁性液体的折射系数随着磁场强度的增大而降低,但磁场强度在 $H < 1114$ A/m 时,折射系数几乎不变,且有趋向饱和的状态。

随磁场强度的增大而变大,而图 6(b)的反射率随磁场强度的增大而变大,两者与理论吻合。但理论值与实验值有一定的差异,这种差异应属于正常情况,因为理论模型还不是完美的理论,比如没有考虑磁颗粒形状的非球状,同时在反射率测量过程中存在一定的误差,测量端测量不全部是光纤端面反射的光功率,而且两路电信号的处理存在一定的差异。

从图 5 可见,温度影响不是很大,而且在实际测量过程中也发现,在温度 $20 \sim 40$ °C 范围内,不同温度下的反射率趋势一致且几乎重合,反射率与外加磁场强度为一一对应关系,温度影响可以忽略。所以利用光纤端面的反射的测量能间接测量外加磁场强度值,同时如果已知磁场强度和电流强度之间的关系,则间接求得电流强度值。

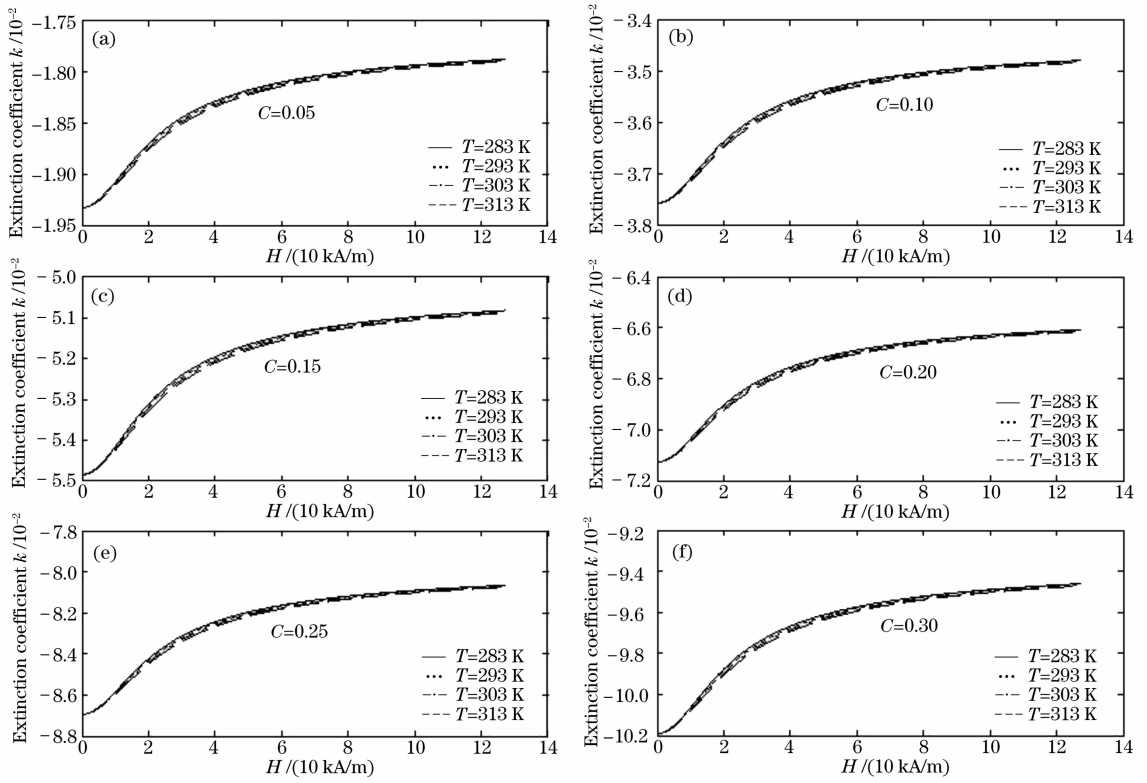


图 4 不同体积密度 C 和不同温度 T 时磁性液体的消光系数 k 与磁场强度 H 的关系曲线

Fig. 4 Extinction coefficient of ferrofluids versus magnetic field intensity at different volume concentrations and temperatures

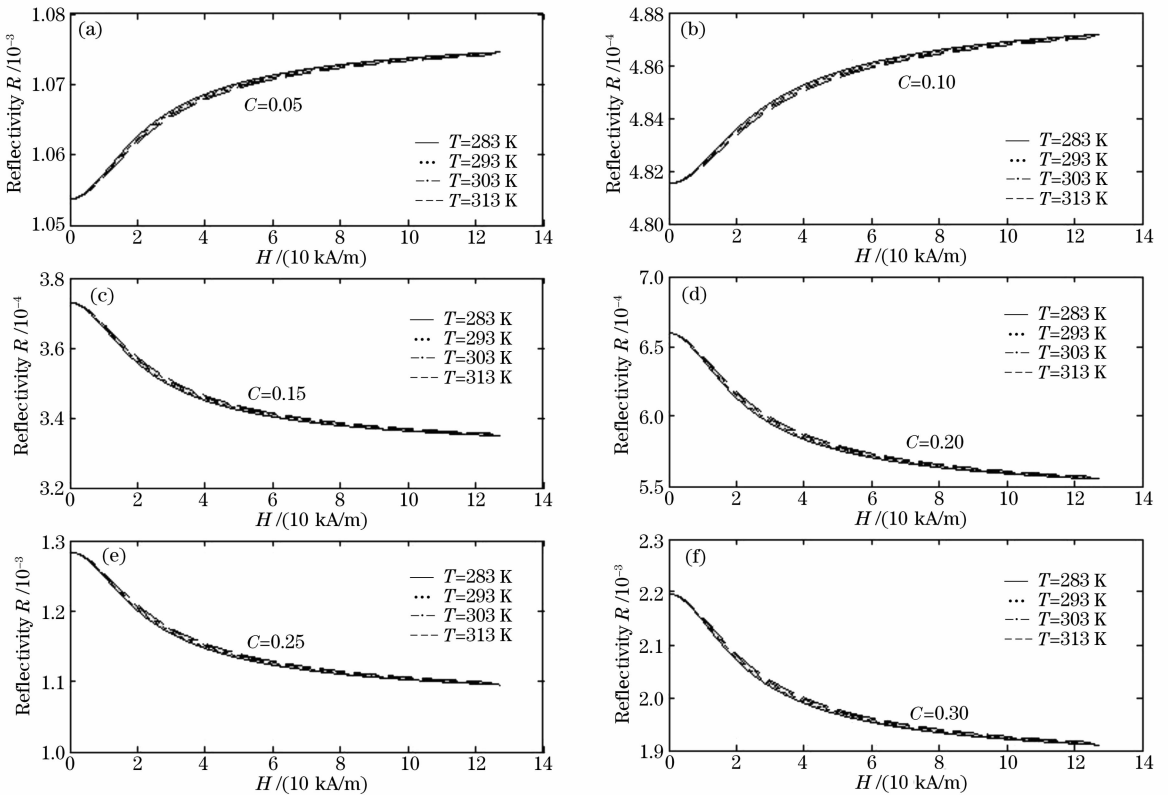


图 5 不同体积密度 C 和不同温度 T 时磁性液体中的光纤端面处能流反射率 R 与磁场强度 H 的关系曲线

Fig. 5 Energy reflectivity on the fiber-optic end face emerged in ferrofluids versus magnetic field intensity at different volume concentrations and temperatures

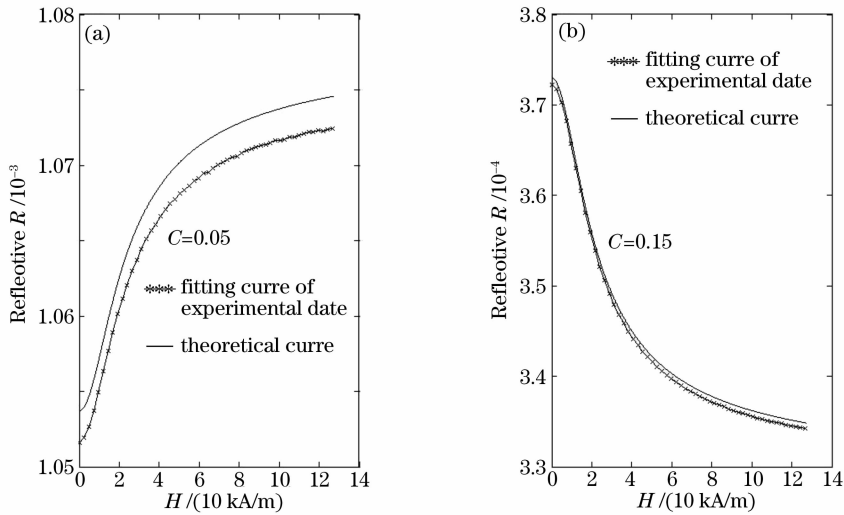


图 6 浸没在磁性液体中的光纤端面能流反射率的理论值与实验数据之间的比较

Fig. 6 Comparison between the theoretical value and the experimental data of energy reflectivity on fiber-optic end face emerged in ferrofluids

实验发现,当外加磁场强度 $H < 1114$ A/m 时,反射率几乎没有变化,只有磁场强度 $H > 1114$ A/m 时,反射率才开始变化,并且随着外加磁场的增大,反射率将趋向饱和状态。所以在实际应用中,要充分考虑到实际应用范围,相应地改变线圈匝数调整灵敏度,或者加偏置电流,提高对小电流的灵敏度。

5 结 论

通过对磁性液体的折射系数和消光系数,以及浸没在磁性液体中光纤端面处的反射率的理论分析和实验测量,得到体积密度和外加磁场强度对磁性液体的折射系数和消光系数的作用比较大,而温度对折射系数的影响不大。从而可知,基于浸没在磁性液体中的光纤端面处的反射率原理设计的磁场和电流光学测量系统,降低了对光的偏振性以及外部环境的依赖性,并且可以通过调节磁性液体的体积密度调整传感元件的灵敏能力。通过合理地设计磁性液体的参数指标,优化其传感测量性能,这种新型的传感测量方法在实际中将较大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 P. C. Scholten. Magnetic measurements on particles in suspension[J]. *IEEE Trans. Magn.*, 1975, **11**(5): 1400~1402
- 2 Werner E. L. Haas, James E. Adams. Diffraction effects in ferrofluids[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**(10): 571~572
- 3 Alain J. Mailfert, Bobouo Nahounou. Dielectric behaviour of a ferrofluid subjected to a uniform magnetic field[J]. *IEEE Trans. Magn.*, 1980, **16**(2): 254~257
- 4 Wayne Reed, Janos H. Fendler. Anisotropic aggregates as the origin of magnetically induced dichroism in ferrofluids[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(8): 2914~2924

- 5 M. Xu, P. J. Ridler. Linear dichroism and birefringence effects in magnetic fluids[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(1): 326~332
- 6 Qi Zhang, Jianhua Wang, Hesun Zhu. A theoretical consideration of the dielectric behaviors of ferrofluid subjected to a magnetic field[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(6): 3999~4002
- 7 Pan Xueli, Pan Yingtian. Charactersities of magneto fluid and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1725~1779
- 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): 1725~1779
- 8 Wang Zhengliang, Chen Shanfei. Photic birefringence effect of magnetic fluid in magnetic field[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(1): 119~124
- 王正良,陈善飞. 磁性液体在磁场中产生光的双折射效应机理[J]. *光学技术*, 2003, **29**(1): 119~124
- 9 Pan Yingtian, Liu Xiande, Du Chongwu *et al.*. Fiber optic magnetic field and current sensor, using magneto-birefringence of dense ferrofluid thin film[C]. *SPIE*, 1991, **1572**: 477~482
- 10 Jong-Wook Seo, Hoyeon Kim, Siduk Sung. Design and fabrication of a magnetic microfluidic light modulator using magnetic fluid[J]. *J. M. M. M.*, 2004, **272**~**276**: e1787~e1789
- 11 Chin-Yih Hong. Optical switch devices using the magnetic fluid thin films[J]. *J. M. M. M.*, 1999, **201**: 178~181
- 12 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
- 13 C. Cotae, O. Baltag, R. Olaru *et al.*. The study of a magnetic fluid-based sensor[J]. *J. M. M. M.*, 1999, **201**: 394~397
- 14 Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
- 徐平,庞拂飞,陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1955~1958
- 15 Su Hui, Huang Xuguang, Zhao Huawei. Fluid refractive-index sensor base on return strength from fiber end[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 107~110
- 苏辉,黄旭光,赵华伟. 基于光纤端面回波的流体折射率传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 107~110
- 16 Shengli Pu, Xianfeng Chen, Yuping Chen *et al.*. Measurement of the refractive index of a magnetic fluid by the retroreflection on the fiber-optic end face [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(171904): 1~3