

基于光纤倏逝波传感器的磁场检测

沈涛^{1,2} 冯月¹ 代海龙¹ 胡超¹ 修翰江¹ 魏新劳²

¹ 哈尔滨理工大学应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

² 哈尔滨理工大学工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 提出了利用光纤倏逝波传感器通过光吸收方法来测量磁场强度的新方法。将磁流体与通信用标准单模光纤局部腐蚀到接近芯层后放入待测磁场中, 当以光吸收峰值为探测光波长时, 光纤表面的倏逝波会受到磁场变化的影响, 通过测量光纤输出光强来计算磁场强度的变化。实验结果表明, 磁场强度在 40~110 mT 范围内, 透射光强度与磁场强度近似成线性关系, 对于长度 15 cm、直径分别为 50 μm 和 35 μm 的腐蚀光纤其测量灵敏度分别为 0.0019 $\mu\text{W}/\text{mT}$ 和 0.02 $\mu\text{W}/\text{mT}$ 。研究结果对光纤磁场传感器的抗干扰和易于实现有重要指导意义。

关键词 光纤光学; 磁场传感; 倏逝波; 磁流体

中图分类号 O433 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s106003

Measurement of Magnetic Field Based on Optical Fiber Evanescent Wave Sensor

Shen Tao^{1,2} Feng Yue¹ Dai Hailong¹ Hu Chao¹ Xiu Hanjiang¹ Wei Xinlao²

¹ College of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

² Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract A new approach is proposed to measure the magnetic field intensity via optical absorption method with optical fiber evanescent wave sensor. A standard single-mode optical fiber used for communication is put into the magnetic field with magnetic fluid and its extramural cladding is local corrupted close to the fiber core. The evanescent wave of the fiber surface is effected by the change of magnetic field, when the absorb peak is used as detection wavelength The change of magnetic field can be obtained by measuring the optical output intensity of the fiber. The experimental results show that there is a linear relationship between the transmitted intensity and magnetic intensity, the magnetic fluid in the concentration range of 40 ~ 110 mT, the detection sensitivity respectively are 0.0019 $\mu\text{W}/\text{mT}$ and 0.02 $\mu\text{W}/\text{mT}$ of 50 μm and 35 μm for the length is 15 cm. The obtained results have instructive function for resistance to interference and easy to implement of optical fiber magnetic field sensor.

Key words fiber optics; magnetic sensor; evanescent wave method; magnetic fluid

OCIS codes 060.2370; 230.3810; 280.4788

1 引 言

磁场传感方法发展至今, 传统磁场传感技术由于电磁干扰等问题受到许多限制, 光纤作为一种本质绝缘的材料在磁场传感方面有着独有的优点, 除了不受电磁干扰, 还有体积小、重量轻、精度高, 易于形成分布式测量等优点^[1-4]。光纤倏逝场传感器利用纤芯表面的倏逝场与周围介质的相互作用, 通过对倏逝波的能量衰减或波长漂移的检测获得周围物质的相关特性。Brown^[5]在 2002 年首次提出使用光学倏逝波的光纤传感

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51307036)、黑龙江省自然科学基金(E201303)

作者简介: 沈涛(1978—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: taoshenchina@163.com

导师简介: 魏新劳(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事基于光纤传感的电力设备监测技术方面的研究。

E-mail: weixinlao@163.com

技术,光纤倏逝波传感器已经成为近年来光纤传感技术的重要发展方向之一^[6-24]。利用光纤倏逝波传感器实现磁场检测方面,近年来先后提出了单模-多模-单模结构的光纤传感器^[7-11],基于磁流体和无芯光纤的磁场传感器^[12-14]以及结合微纳结构光纤和磁致伸缩技术的磁场传感^[15-24]等。为了加强纤芯表面倏逝场与介质的作用,需要去除部分光纤包层以提高传感灵敏度。去除包层的方法主要有两种,腐蚀法和研磨法^[25-28]。腐蚀法主要指利用氢氟酸溶液通过控制其浓度和腐蚀时间从而制造出不同直径的传感光纤,这种方法对实验条件要求不高,且有低成本,所得光纤表面平滑,可一次腐蚀多根光纤等优点。

磁流体作为一种新型磁光材料,其磁化性能及其众多光学性质使得磁流体在光纤传感领域有着十分广泛的应用前景,虽然目前关于磁流体测量磁场的传感技术已有报道^[12-14],但将磁流体与光纤直接结合进行磁场测量的仍少见报道。基于此,本文提出了一种基于磁流体和腐蚀光纤的磁场传感方法,将磁流体与腐蚀光纤结合起来,把磁流体作为光纤的外包层,通过磁流体的磁场可控折射率的性质再加可变的磁场改变磁流体的折射率以实现所加磁场的传感,使传感系统更容易实现,并且具有低成本高精度等优点。

2 工作原理

2.1 倏逝场传感原理

光纤中的传输光在纤芯和包层表面发生全反射,会产生倏逝波,如果以待测物代替部分包层,待测物的吸收会使倏逝波能量衰减,这样就可以通过检测传输能量的变化来得到待测物的相关信息。

根据光的电磁理论,光波在光纤中传播,在全反射时包层介质中存在一定透射波,并具有相应的透射深度,即为倏逝波。其在包层介质中的有效透射深度 d (倏逝波的电磁场强度从界面开始幅度降到界面处的 $1/e$ 处的距离)约与光波波长同 λ 一数量级。表达式为

$$d = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{n_1^2 \sin^2\theta - n_2^2}}, \quad (1)$$

式中 θ 为入射角, n_1 , n_2 分别为纤芯和周围介质的折射率。

可以看出,在入射角 θ 不变的情况下,环境介质折射率越小,能量传输损失越大。Nie^[29]等研究提出,倏逝波的有效作用范围约为几十到几百纳米,其传感结果主要反应在光功率的输出特性上。利用这一原理,采用磁流体作为腐蚀后的光纤新的包层,通过 HF 酸腐蚀法减小纤芯直径从而增强传感灵敏度,传感结构如图 1 所示,通过改变磁流体的折射率等参数改变倏逝波的透射深度,从而通过检测到不同的功率衰减实现磁场传感。

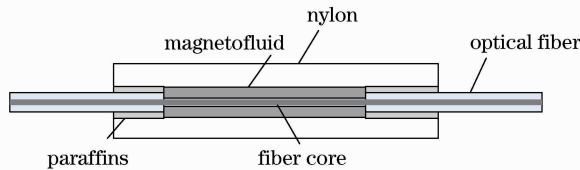


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor

根据朗贝尔定律

$$P_o = P_i \exp(-\eta \epsilon CL), \quad (2)$$

式中 P_o 为传感器的输出光功率, P_i 为无磁流体作用时的输出光功率,这里看做为传感器的输入光功率, L 为传感部分长度, C 为介质浓度, ϵ 为摩尔吸收系数, η 为包层中光功率所占百分比即包层光功率因子。

假设折射率不随浓度变化而变化,则传感器灵敏度^[30]可表示为

$$S = -\frac{1}{P_o} \frac{dP_o}{dC}. \quad (3)$$

可见,在溶液浓度相同的情况下,溶液折射率对输出光功率影响最大。

2.2 磁流体光学传感特性描述

当外磁场作用于磁流体时,其内部的磁性颗粒会发生团簇,形成链状结构,呈现各向异性^[9],使得磁流体

有效介电常数发生变化,与此同时,折射率发生变化,即为磁流体的可调谐折射率特性。

磁流体的有效介电常数为^[31]

$$\epsilon_{MF} = \frac{-\epsilon_c(1-f) - \epsilon_l(f-1) + \sqrt{[\epsilon_c(1-f) + \epsilon_l(f-1)]^2 + 4(1+f)^2 \epsilon_c \epsilon_l}}{2(1+f)}, \quad (4)$$

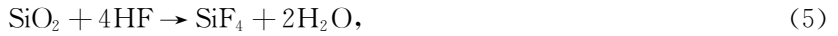
式中 ϵ_c 和 ϵ_l 分别为磁链和液相的介电常数, ϵ_l 随着外加磁场强度变化而变化, ϵ_c 为常数, $f = (A_c/A)/(1 - A_c/A)$, 其中, A_c 为磁流体表面一定面积 A 中磁柱所占面积, A_c/A 为磁链所占比例, 该比例大小依赖于外加磁场大小。由(4)式得,磁流体有效介电常数为磁场强度的函数。由 $n_{MF} = \sqrt{\epsilon_{MF}}$, 可以得到磁流体的折射率与外加磁场的函数关系式。Hong 等^[32] 研究发现,磁流体的折射率 n_{MF} 和外加磁场强度关系满足 Langevin 方程。

利用外加磁场对磁流体折射率的调谐作用,使得传感光路中倏逝波效应产生的损耗大小与磁场强度变化相对应,从而通过检测输出光功率大小随外加磁场强度的变化最终实现磁场传感。

3 实验结果与讨论

3.1 光纤包层腐蚀过程

在室温下进行腐蚀实验时, Tso 等^[25] 研究表明 HF 溶液的腐蚀率与其浓度有很大关系,低浓度(2~24%)时,



两个反应同时进行,且比例不固定,实验重复性和腐蚀率线性差,故实验采用浓度为 40% 的 HF 不经稀释对光纤包层进行腐蚀。由于 HF 酸为分解硅溶剂^[9],对大部分非硅质材料腐蚀作用很小,实验中用尼龙 66 材料制作光纤腐蚀容器,并用石蜡加以固定,该容器同时用于传感,从而避免操作过程中由于光纤直径很细而被碰断。根据原理介绍可知,光纤腐蚀区域越长,对外界吸收介质越敏感,但同时传感头损耗也随之增加,导致测量困难,综合考虑各种因素决定腐蚀长度约为 15 mm。

实验时,用剥皮钳去除单模光纤涂覆层 15 mm 长,用酒精棉进行擦拭,然后将该部分置于容器槽内,并用石蜡将其固定,在槽内注入 HF 进行腐蚀并计时,达到腐蚀时间后,迅速用注射器吸出 HF,然后对其进行冲洗,烘干,并用电子显微镜测量直径。

通过控制不同的腐蚀时间,实验得到了光纤直径与腐蚀时间的关系如图 2 所示。由图 2 可得,浓度一定的情况下,光纤直径和腐蚀时间几乎成线性关系,即腐蚀速率基本恒定。图 3 为电子显微镜下不同腐蚀时间下所得光纤照片。

3.2 磁场传感器实验

进行磁场传感的实验装置如图 4 所示,实验采用放大自发辐射(ASE)光源,光源发出的光入射到倏逝波磁场传感器中,用光谱仪(OSA)探测传输光谱。磁场发生装置为两块长方形永磁铁,通过调节两磁铁之间的距离改变磁场强度,并用高斯计对磁场进行测量。为了保证磁场测量的准确性,实验中,采用两个二维调节

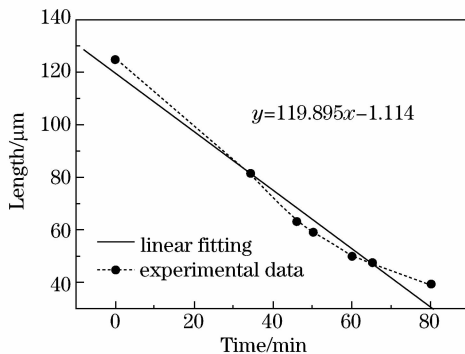


图 2 光纤直径随腐蚀时间的变化关系

Fig. 2 Fiber diameter changes with corrosion time

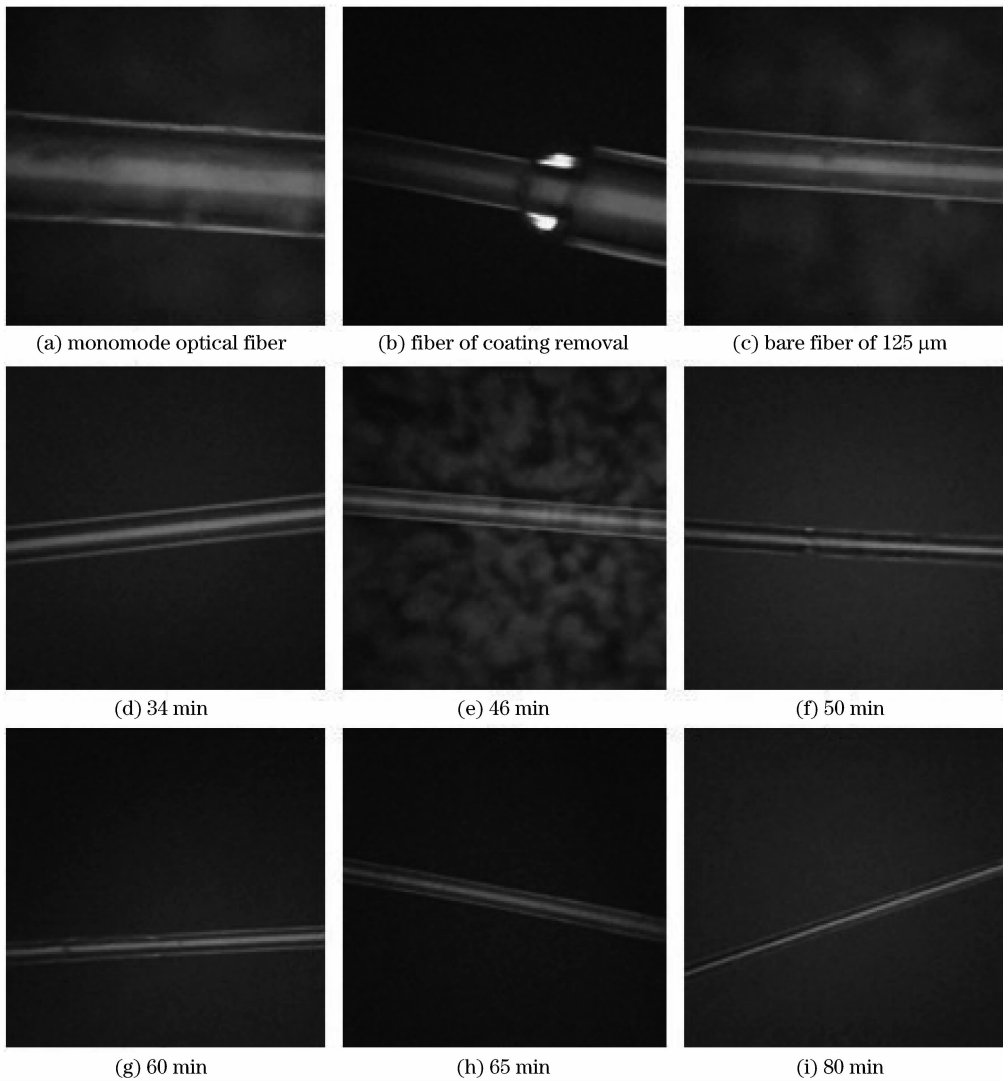


图 3 光纤表面处理微观图

Fig. 3 Microgram of fiber surface processing

平台固定两块磁铁,先将磁铁调节到几个固定位置,用高斯计测量其中心位置的磁场强度,然后将传感光纤垂直于磁场方向置于该中心位置,进行光谱采集。实验时,控制磁场方向与光传播方向相互垂直,可以提高检测灵敏度,因为磁流体在外加磁场作用时,其中纳米颗粒发生团簇从而会在沿磁场方向形成磁柱,当光传播的方向与磁场方向相互垂直时,有更多的纳米颗粒同倏逝场相互作用,从而使磁场检测的灵敏度更高。

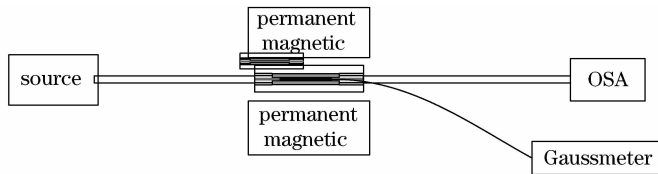


图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

图 5 和图 6 分别为所得直径 $35\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 光纤传感器实验中不同磁场下的透射谱。由透射光谱可以看出,随着磁场的增大,光谱峰值功率随之增大,也即该传感系统的透射光功率变大,并且直径 $35\ \mu\text{m}$ 光纤的透射光功率大于 $50\ \mu\text{m}$ 光纤的透射光功率,约相差一个数量级,说明腐蚀直径接近纤芯的光纤具有更明显的透射光效果。

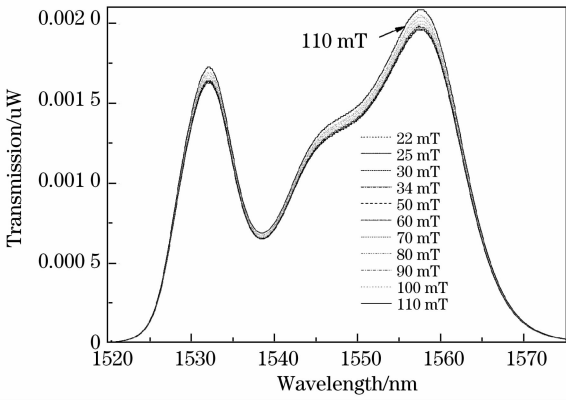


图 5 光纤直径 35 μm 时传感器透射谱随磁场强度的变化

Fig. 5 Transmission spectra under different magnetic field strengths with fiber diameter of 35 μm

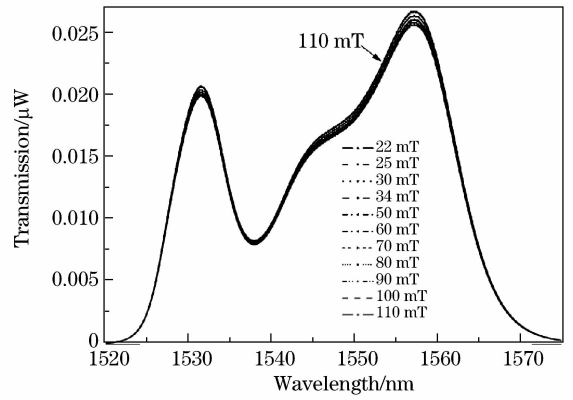


图 6 光纤直径 50 μm 时传感器透射谱随磁场强度的变化

Fig. 6 Transmission spectra under different magnetic field strengths with fiber diameter of 50 μm

图 7 和图 8 分别为直径 50 μm 和 35 μm 的光纤在波长为 1557.1 nm 处的光透射率随磁场强度变化的关系曲线,可以看出,磁场较弱时,输出光功率变化不明显,当场强超过 40 mT 时,透射功率与磁场几乎成线性变化,并且在 40~110 mT 范围内有较好的线性关系。除此之外,对比两图,根据拟合结果可以看出,直径 35 μm 的传感光纤的检测灵敏度为 0.02 $\mu\text{W}/\text{mT}$,直径 50 μm 光纤的检测灵敏度为 0.0019 $\mu\text{W}/\text{mT}$,直径 35 μm 的光纤比直径 50 μm 的光纤检测灵敏度高一个数量级,为了提高磁场检测灵敏度需要将腐蚀直径接近纤芯。

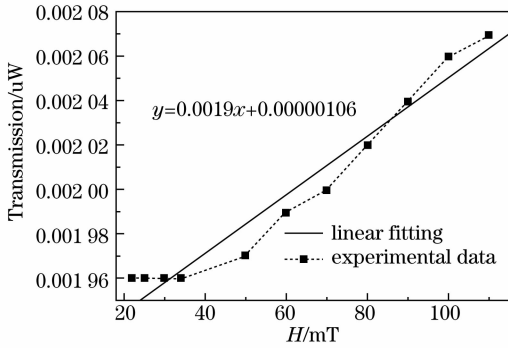


图 7 光纤直径 50 μm 时 1557.1 nm 处透射率随磁场强度的变化

Fig. 7 Transmissivity change with the magnetic field intensity at 1557.1 nm with fiber diameter of 50 μm

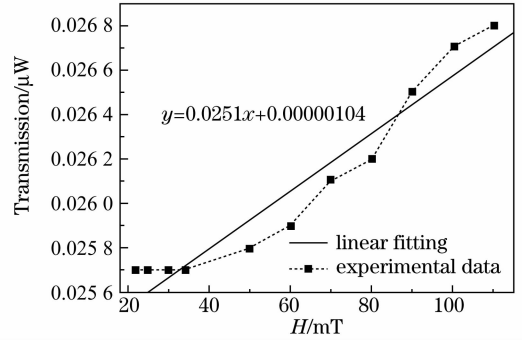


图 8 光纤直径 35 μm 时 1557.1 nm 处透射率随磁场强度的变化

Fig. 8 Transmissivity change with the magnetic field intensity at 1557.1 nm with fiber diameter of 35 μm

4 结 论

提出了一种基于单模光纤腐蚀和磁流体的倏逝波磁场传感器,根据磁流体的折射率可调谐特性和倏逝波原理,用腐蚀后的光纤测量不同强度磁场,从而得出在一定磁场范围内吸光度与磁场强度成线性关系的结论,实验制作的传感器具有成本低,制作简单,容易实现等优点。通过实验可以得到结论:相同条件下,纤芯直径越小,实验现象越明显,传感灵敏度越高,磁场在 40~110 mT 范围内测量具有较好的线性度,对于长度 15 cm、直径分别为 50 μm 和 35 μm 的腐蚀光纤其测量灵敏度分别为 0.0019 $\mu\text{W}/\text{mT}$ 和 0.02 $\mu\text{W}/\text{mT}$ 。所得结果能够为基于磁流体的光纤磁场传感研究提供参考,若采用电流产生磁场,该系统还可实现电流传感用于电流测量。另外如果适当的延长腐蚀时间,采用直径更小的光纤,更换磁饱和强度更大的磁流体,还可以扩大可检测的线性范围。

参 考 文 献

1 A Candiani, A Argyros, S G Leon-Saval, *et al.*. A loss-based magnetic field sensor implemented in a ferrofluid infiltrated microstructured polymer optical fiber [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104: 111106.

- 2 Wen Feng, Wu Baojian, Li Zhi, *et al.*. Temperature-insensitive magnetic-field measurement using all-fiber Sagnac interferometers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 130701.
文 峰, 武宝剑, 李 智, 等. 基于全光纤萨格纳克干涉仪的温度不敏感磁场测量[J]. *物理学报*, 2013, 62(13): 130701.
- 3 Zhao Peng, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.*. Fiber optic acoustic vibration sensor for the monitoring of water sublimator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106003.
赵 鹏, 刘铁根, 江俊峰, 等. 用于水升华器监测的光纤声振动传感器研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106003.
- 4 Liu Tiegeng, Wang Shuang, Jiang Junfeng, *et al.*. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1681-1693.
刘铁根, 王 双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1681-1693.
- 5 R S Brown, I Kozin, Z G Tong, *et al.*. Fiber-loop ring-down spectroscopy [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2002, 117(23): 10444-10447.
- 6 S M Chandani, N A F Jaeger. Fiber optic temperature sensor using evanescent fields in D fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 17(12): 2706-2708.
- 7 Li Lin, Han Qun, Chen Yaofei, *et al.*. An all-fiber optic current sensor based on ferrofluids and multimode interference [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(6): 1749-1753.
- 8 Y Chen, Q Han, T Liu, *et al.*. Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode-multimode-single-mode structure and magnetic fluid [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(20): 3999-4001.
- 9 P Zu, C Chan, W Lew, *et al.*. Magneto-optic fiber Sagnac modulator based on magnetic fluids [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(8): 1425-1427.
- 10 Zhang Rongxiang, Han Qun, Liu Tiegeng, *et al.*. Investigation of characteristics of single mode-multimode-single mode all-fiber optic current sensor with broadband light source inputting [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0705003.
张荣香, 韩 群, 刘铁根, 等. 宽带光源入射下单模-多模-单模全光纤电流传感器特性研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0705003.
- 11 D V Lim. Detection of microorganisms and toxins with evanescent wave fiber-optic biosensors[C]. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(6): 902-907.
- 12 Huang Guojing, Zhou Bin, Chen Zhuo, *et al.*. Magnetic-field sensor utilizing the ferrofluid and thin-core fiber modal interferometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(1): 333-336.
- 13 Song Binbin, Miao Yiping, Lin Wei, *et al.*. Loss-based magnetic field sensor employing hollow core fiber and magnetic fluid [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2283-2286.
- 14 Miao Yiping, Wu Jixuan, Lin Wei, *et al.*. Magnetic field tunability of square tapered no-core fibers based on magnetic fluid [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(23): 3998-4003.
- 15 Wang Chuji, Chamini Herath. Fabrication and characterization of fiber loop ringdown evanescent field sensors [J]. *Measurement Science And Technology*, 2010, 21(8): 085205.
- 16 Wu Jixuan, Miao Yiping, Wei Lin, *et al.*. Dual-direction magnetic field sensor based on core-offset microfiber and ferrofluid [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(15): 1581-1584.
- 17 A Yariv, H V Winsor. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers[J]. *Opt Lett*, 1980, 5(3): 87-89.
- 18 Liu Tiegeng, Chen Yaofei, Han Qun, *et al.*. Magnetic field sensor based on u-bent single-mode fiber and magnetic fluid [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(6): 5300307.
- 19 Lv Riqing, Zhao Yong, Wang Dan, *et al.*. Magnetic fluid-filled optical fiber fabry-pérot sensor for magnetic field measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(3): 217-219.
- 20 Zheng Yangzi, Dong Xinyong, Yang Runguang, *et al.*. Magnetic field sensor with optical fiber bitaper-based interferometer coated by magnetic fluid [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(9): 3148-3151.
- 21 Gong Yuan, Rao Yunjiang, Zhao Tian, *et al.*. Fiber optic Fabry-Prot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(23): 1708-1710.
- 22 S K Khijwania, K L Srinivasan, J P Singh. An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, 104(2): 217-222.
- 23 V R Machavaram, R A Badcock, G F Fernando. Fabrication of intrinsic fibre Fabry Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching [J]. *Sens Actuators A*, 2007, 138(1): 248-260.
- 24 Zu P, Chan C, Lew W, *et al.*. Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 4(2): 491-498.
- 25 S T Tso, J A Pask. Reaction of glasses with hydrofluoric technology to wet etching of dilicon [J]. *J Am Ceram Soc* 1982, 65(7): 360-362.
- 26 H S Haddock, P M Shankar, R Mutharasan. Fabrication of biconical tapered optical fibers using hydrofluoric acid [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2003, 97(1): 87-93.
- 27 Gong Yuan, Guo Yu, Rao Yunjiang, *et al.*. Fiber optic Fabry-Prot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(23): 1708-1710.
- 28 S M Chandani, N A F Jaeger. Fiber optic temperature sensor using evanescent fields in D fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 17(12): 2706-2708.
- 29 S M Nie, S R Emery. Probing the structure of single-molecule surface-enhanced Raman scattering hot spots [J]. *Science*, 1997, 275(5305): 1102-1106.
- 30 Lou Jun, Xu Hongzhi, Huang Jie, *et al.*. Novel segmented structure optic fiber evanescent wave sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105006.
楼 俊, 许宏志, 黄 杰, 等. 新型的分段结构光纤倏逝波传感器 [J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105006.
- 31 S Y Yang, J J Chieh, H E Horng, *et al.*. Origin and applications of magnetically tunable refractive index of magnetic fluid films [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(25): 5204-5206.
- 32 C Y Hong, H E Horng, S Y Yang. Tunable refractive index of magnetic fluids and its applications [J]. *Physica Status Solidi C*, 2004, 1(7): 1604-1609.