

基于磁流体填充的光子晶体光纤传感特性研究

刘剑飞 刘帆 曾祥烨 卢嘉 王蒙军

河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401

摘要 在光子晶体光纤(PCF)包层空气孔中填充磁流体,利用磁流体(MF)折射率可调节特性实现光子晶体光纤光学特性的调谐和传感。采用全矢量有限元法分析了填充 MF 对光子晶体光纤模式和损耗特性的影响,分析了结构参量对填充 MF 圆孔 PCF 损耗灵敏度的影响,比较了填充 MF 圆孔和椭圆孔 PCF 的损耗灵敏度特性,并对填充 MF 椭圆 PCF 的温度与磁场特性进行了研究。仿真结果表明,填充 MF 使光子晶体光纤模式有效折射率增大,模场面积增大,损耗增加;椭圆孔 PCF 中 MF 折射率改变引起的损耗灵敏度约为圆孔 PCF 的 4 倍;填充 MF 的椭圆空气孔 PCF 的温度和磁场灵敏度分别为 -0.279 dB/°C、 0.06 dB/Oe($1 \text{ Oe} \cong 1000/4\pi \text{ A/m}$),为设计新型高灵敏度光纤传感器提供了参考。

关键词 光纤光学;光纤传感;有限元法;光子晶体光纤;磁流体

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.070601

Sensing Characteristics of Photonic Crystal Fiber Filled with Magnetic Fluid

Liu Jianfei Liu Fan Zeng Xiangye Lu Jia Wang Mengjun

School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract Air hole in photonic crystal fiber(PCF) cladding is filled with magnetic fluid(MF). Tuning and sensing of PCF optical properties can be realized by using the refractive index tunable property of MF. The effects of filling MF on the mode and loss characteristics of PCF are analyzed with full vector finite element method. The influences of structural parameters on loss sensitivity of the circular hole PCF filled with MF are analyzed. The loss sensitivity characteristics of circular hole and elliptical hole PCFs filled with MF are compared, and the temperature and magnetic field characteristics of elliptical PCF filled with MF are investigated. Simulation results show that fiber mode effective refractive index, mode area and loss of PCF are increased by filling MF. The loss sensitivity caused by the change of MF refractive index in elliptical hole PCF is about 4 times of that of circular hole PCF. The temperature and magnetic sensitivities of elliptical air hole PCF filled with MF are -0.279 dB/°C and 0.06 dB/Oe ($1 \text{ Oe} \cong 1000/4\pi \text{ A/m}$), respectively. It provides reference for the design of novel high sensitivity fiber.

Key words fiber optics; fiber sensing; finite element method; photonic crystal fiber; magnetic fluid

OCIS codes 060.2370; 160.3820; 230.1150

1 引言

近年来,基于光子晶体光纤(PCF)填充应用的研究是光子晶体光纤研究的热点之一。通过在 PCF 包层空气孔中填充可调谐的功能材料,改变温度、电磁、应力等外部条件,可以实现对 PCF 光学特性的调谐和控制。基于填充功能材料光子晶体光纤设计的新型光纤传感器具有结构简单、体积小、高灵敏度等特点^[1-3]。

磁流体(MF)是一种光学特性随外加场变化而变化的新型纳米材料,它既有固体磁性的可调节特性,又

收稿日期: 2016-01-12; **收到修改稿日期:** 2016-02-23; **网络出版日期:** 2016-06-21

基金项目: 天津市自然科学基金(15JCYBJC17000)、河北省自然科学基金(F2014202036, F2015202331)、河北省高层次人才资助项目(C2013001048)

作者简介: 刘剑飞(1968—),男,博士,教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: jfliu@hebut.edu.cn

具有液体的流动性,易于填充。研究者将光子晶体光纤与磁流体结合,设计了诸多可调谐光子器件^[4-5]。在光子晶体光纤中填充磁流体,可获得温度和磁场传感等应用^[6-7]。2011年,Miao等^[8]研究了填充 Fe_3O_4 磁流体光子晶体光纤的温度调谐特性。 Fe_3O_4 磁流体折射率的温度敏感系数为 $-2.4 \times 10^{-4}/\text{K}$,温度在 $26 \sim 96 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化时,光子晶体光纤损耗灵敏度达到 $0.045 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 。2012年,Zu等^[9]利用光子晶体光纤和磁流体设计了新型磁光传感器。研究表明,在折射率引导型光子晶体光纤空气孔中填充高折射率的磁流体,当磁流体折射率高于二氧化硅的折射率时,折射率引导型光子晶体光纤变为带隙型光子晶体光纤。在该传导机制下,新型传感器对磁场的灵敏度高达 $1.56 \text{ nm}/\text{Oe}$ ($1 \text{ Oe} \triangleq 1000/4\pi \text{ A/m}$),比传统传感器灵敏度高 $2 \sim 3$ 个数量级。2013年,Gao等^[10]设计了全光纤磁场传感器,所利用的磁流体折射率小于二氧化硅材料,光子晶体光纤为全内反射传光,设计的磁场传感器拥有 0.09 Oe 的分辨率,为高精度磁场测量提供了思路。

本文研究了在圆形与椭圆空气孔结构光子晶体光纤中填充磁流体对其传输性能的影响。从外场诱导磁流体折射率变化引起填充PCF光传输特性变化的原理出发,分析比较了两种类型光子晶体光纤填充磁流体后损耗特性的变化情况,获得了PCF高灵敏度的传感与调制应用,为设计新型光纤传感器与调谐器件提供了参考。

2 理论分析

2.1 理论基础

光波在光子晶体光纤中传播遵循麦克斯韦方程。在各向异性光波导中,根据麦克斯韦方程推导出亥姆霍兹方程

$$\nabla \times (\boldsymbol{\mu}_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \boldsymbol{\varepsilon}_r \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times (\boldsymbol{\varepsilon}_r^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \boldsymbol{\mu}_r \mathbf{H} = 0, \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 和 $\boldsymbol{\mu}_r$ 分别为相对介电张量和相对磁导率张量, k_0 为真空中的波数, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 表示电场和磁场。

利用有限元法对(1)式、(2)式进行求解,可以得到光波在光子晶体光纤中的电场分布 E 、模式有效折射率 n_{eff} 和传播常数 β 。模场面积 A_{eff} 反映了光在PCF中的分布情况,可以表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint |E(x,y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x,y)|^4 dx dy}. \quad (3)$$

PCF的损耗包括吸收损耗、散射损耗和限制损耗。吸收损耗主要是由光纤材料和杂质离子对光能的吸收引起的;散射损耗主要由瑞利散射引起;限制损耗是PCF所特有的,与PCF包层微结构有关。PCF的限制损耗可以通过传播模式有效折射率的虚部得到。

$$L = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6, \quad (4)$$

式中 λ 为光在真空中的波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的虚部。在PCF中,传输波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,吸收损耗和散射损耗之和约为 $1 \text{ dB}/\text{km}$ ^[7]。影响PCF损耗的主要因素是限制损耗。

2.2 传感机理

光波在光子晶体光纤中传输时的模场和损耗特性与光子晶体光纤包层的折射率分布有关。将磁流体填充在光子晶体光纤空气孔中,磁流体折射率变化导致光子晶体光纤包层折射率发生变化,填充磁流体光子晶体光纤的传光特性与填充磁流体的折射率有紧密联系。

磁流体的折射率与磁流体的粒子、基液、浓度、温度、磁场大小有关。当磁流体中粒子、基液和浓度确定时,磁流体折射率的大小基本确定,可由郎之万(Langevin)函数表示为^[11]

$$n_{\text{MF}} = (n_s - n_0) \coth \left[\alpha \frac{H - H_c}{T} - \frac{T}{\alpha(H - H_c)} \right] + n_0, H > H_c, \quad (5)$$

式中 H 为磁场强度, H_c 为临界磁场强度, n_0 和 n_s 分别为初始折射率和饱和折射率, T 为外界温度。由(5)式可知,外界温度和磁场强度可以改变磁流体的折射率。对于一定浓度的磁流体,通过调节外界温度和磁场强度改变磁流体的折射率,可以调节光子晶体光纤的光学特性,实现外部温度或磁场对光子晶体光纤光学特

性的调谐。

磁流体折射率随外部环境的变化相对变化,通过设计光子晶体光纤的结构,提高其传感的灵敏度显得尤为重要。研究了椭圆形空气孔结构光子晶体光纤填充磁流体后的特性变化,并传统圆孔光子晶体光纤的特性进行了分析比较。分析表明,该类型的 PCF 在磁流体折射率变化时能更大程度地改变其传输特性,从而获得更高的灵敏度。

3 实验设计与仿真分析

3.1 实验设计

图 1 给出了实验系统结构图,填充磁流体的光子晶体光纤通过标准单模光纤(SMF)一端与放大自发辐射(ASE)宽带光源连接,另一端接光谱仪(OSA)。宽带光源波长范围为 1520~1620 nm,光谱仪记录透射光的光功率,温控箱或者螺线管分别控制环境温度和磁场。该实验系统中椭圆孔 PCF 的拉制和满足折射率要求的磁流体的制备是难点。基于该实验结构利用有限元软件 COMSOL 对填充磁流体的 PCF 的温度与磁场传感特性进行了研究。

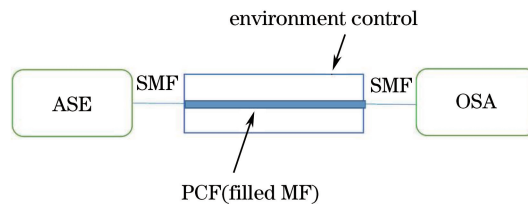


图 1 实验系统结构图

Fig. 1 Schematic of experimental system

3.2 填充磁流体光子晶体光纤损耗特性分析

图 2 为圆孔与椭圆孔 PCF 横截面。两类光纤的包层均为 5 层空气孔,纤芯直径 $d_1 = 7 \mu\text{m}$,圆孔 PCF 的包层空气孔直径 $d = 2.57 \mu\text{m}$,椭圆孔长轴 $a = 3.2 \mu\text{m}$,短轴 $b = 1.28 \mu\text{m}$,空气孔的平均间距 $\Lambda = 5.12 \mu\text{m}$,光纤基底材料为二氧化硅,折射率为 $n_1 = 1.445$,空气折射率为 $n_2 = 1$ 。

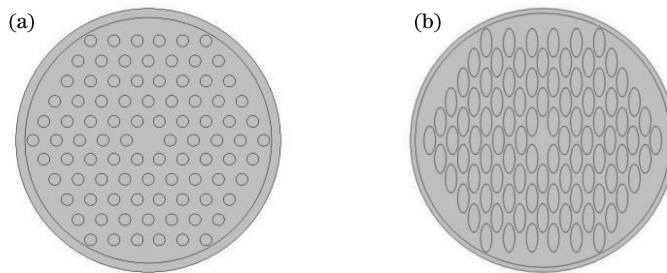


图 2 PCF 横截面。(a) 圆孔 PCF; (b) 椭圆孔 PCF

Fig. 2 Cross sections of the PCFs. (a) Circular hole PCF; (b) elliptical hole PCF

对圆孔和椭圆孔 PCF 光子晶体光纤在填充磁流体前后基模的模场分布情况进行了仿真分析。选取的磁流体是水基的 Fe_3O_4 溶液,由直径约为 10 nm 的 Fe_3O_4 磁性颗粒、包裹于其上的表面活性剂以及溶剂水组成,溶液质量浓度为 1 mg/mL,磁饱和强度 0.96 emu/g,其中 $1 \text{ emu/g} = 1 (\text{A} \cdot \text{m}^2)/\text{kg}$,在 20 °C 无磁场环境中,磁流体折射率约为 1.340。表 1 和表 2 分别给出了两类光子晶体光纤模式有效折射率 n_{eff} 、模场面积 A_{eff} 和限制损耗 L 的仿真结果。结果表明,两类光子晶体光纤的基模都被很好地束缚在纤芯区域,椭圆孔 PCF 的模场面积和限制损耗都小于圆孔 PCF 的模场面积和限制损耗,椭圆孔 PCF 相比于圆孔 PCF 具有更好的导光性能,对光强的束缚能力更强。

表1 圆孔和椭圆孔 PCF 基模有效折射率 n_{eff} 、模场面积 A_{eff} 和限制损耗Table 1 n_{eff} , A_{eff} and confinement losses of the circular hole and elliptical hole PCFs

| | Refractive index n_{eff} | Mode area $A_{\text{eff}}/(\mu\text{m}^2)$ | Confinement loss $L/(\text{dB/m})$ |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| Circular hole PCF | 1.437808 | 26.69 | 1.24×10^{-8} |
| Elliptical hole PCF | 1.429740 | 13.49 | 4.13×10^{-16} |

表2 填充磁流体圆孔和椭圆孔 PCF 基模有效折射率 n_{eff} 、模场面积 A_{eff} 和限制损耗Table 2 n_{eff} , A_{eff} and confinement losses of the circular and elliptical hole PCFs filled with MF

| | Refractive index n_{eff} | Mode area $A_{\text{eff}}/(\mu\text{m}^2)$ | Confinement loss $L/(\text{dB/m})$ |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| Circular hole PCF | 1.438966 | 33.45 | 2.08×10^{-4} |
| Elliptical hole PCF | 1.433033 | 17.69 | 5.59×10^{-12} |

填充磁流体后纤芯和包层的折射率差减小,纤芯对光的束缚能力减小,基模的有效折射率增大;同时由于磁流体对光的吸收作用,光子晶体光纤损耗增大。此外,由于椭圆孔 PCF 包层空气孔所占比例大于圆孔 PCF,填充磁流体之后,折射率变化更大。这为高灵敏度传感器的设计提供了可能。

3.3 PCF 结构参量对填充磁流体损耗灵敏度的分析

PCF 的结构参量对其传输特性的影响至关重要。图 3 和图 4 分别给出了圆孔 PCF 不同空气孔的间距和直径对填充磁流体 PCF 损耗灵敏度的变化情况。

图 3 给出了 $\Lambda = 5.12 \mu\text{m}$,空气孔直径 d 分别为 $2.00, 2.57, 3.00 \mu\text{m}$ 情况下,入射波波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$,圆孔 PCF 限制损耗 L 随填充磁流体折射率 n 的变化情况。由图 3 可知,当空气孔间距一定时, d 越大,对应变化曲线斜率越大,即填充磁流体的损耗灵敏度越高。这是由于 d 越大,磁流体填充比越大,从而在磁流体折射率变化时引起的光纤损耗变化越大。当磁流体填充 PCF 用于光纤传感和外加磁场调制时,要在限制损耗和灵敏度之间进行权衡。

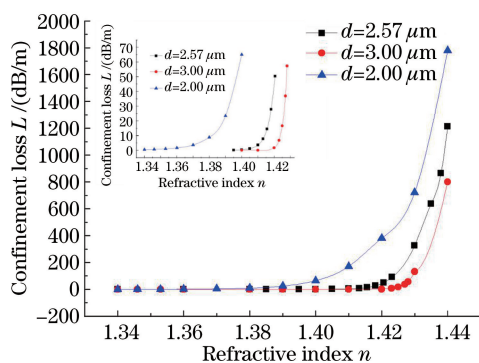
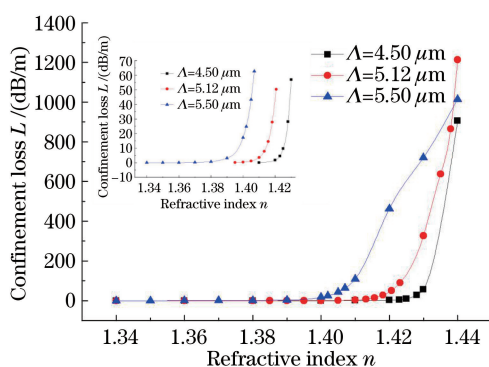
图3 不同 d 情况下填充磁流体 PCF 限制损耗随磁流体折射率的变化Fig. 3 Variation of confinement loss of PCFs filled with MF versus refractive index of MF with different d 图4 不同 Λ 情况下填充磁流体 PCF 限制损耗随磁流体折射率的变化Fig. 4 Variation of confinement loss of PCFs filled with MF versus refractive index of MF with different Λ

图 4 给出了 $d = 2.57 \mu\text{m}$,包层空气孔间距 Λ 分别为 $4.50, 5.12, 5.50 \mu\text{m}$ 情况下,入射波波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$,圆孔 PCF 限制损耗 L 随填充磁流体折射率 n 的变化情况。由图 4 可知,当空气孔直径一定,磁流体折射率增大时, Λ 越大对应损耗的变化曲线斜率越小,即填充磁流体的损耗灵敏度越低。这是由于 Λ 越大磁流体填充比越小,磁流体折射率变化时引起光纤的损耗变化越小。

3.4 两类 PCF 填充磁流体损耗灵敏度的分析和比较

图 5 为两类光子晶体光纤填充磁流体后限制损耗灵敏度的变化情况。由图 5 可知,当磁流体折射率从 1.34 增大到 1.41 时,圆孔 PCF 限制损耗的变化很小,不利于光纤传感和调制;当磁流体折射率从 1.41 增大到 1.44 时,光子晶体光纤的损耗迅速增大,从 0.4 dB/m 增大到 1213 dB/m ;当磁流体折射率为 1.44 时,由于纤芯和包层的折射率差减小,圆孔 PCF 对传输光的束缚能力减弱,光纤的损耗大大增加。由于椭圆孔 PCF 的横轴和纵轴方向结构不对称,因此椭圆孔 PCF 具有大的填充比。当磁流体折射率变化时有效折射率发生

很大的变化,椭圆孔 PCF 的限制损耗灵敏度增加。磁流体折射率在 1.43~1.436 变化范围时,椭圆孔 PCF 损耗从 0.3 dB/m 增大到 50.7 dB/m,损耗灵敏度约为 20652.38 dB/m,是在圆孔 PCF 填充情况下灵敏度的 4 倍。

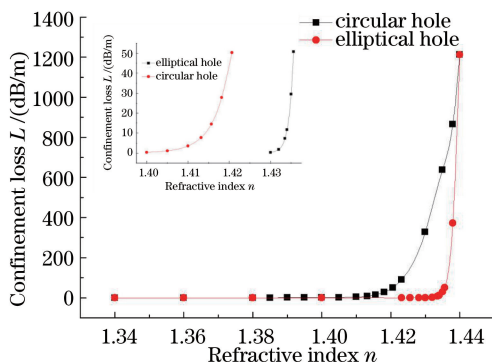


图 5 两类填充磁流体 PCFs 限制损耗随磁流体折射率的变化

Fig. 5 Variation of confinement loss of two types of PCFs filled with MF versus refractive index of MF

3.5 椭圆孔 PCF 温度与磁场特性分析

磁流体的温敏系数为 $-2.4 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$,比二氧化硅的温敏系数高 2 个数量级,因此温度引起的光纤本身的折射率变化可以忽略不计。研究中使用的是椭圆孔 PCF,椭圆长轴为 $1 \mu\text{m}$,短轴为 $0.4 \mu\text{m}$,孔间距为 $1.6 \mu\text{m}$ 。填充磁流体为水基 Fe_3O_4 磁流体,溶液质量浓度为 1 mg/mL ,磁饱和强度 0.96 emu/g ,室温 20°C 时磁流体折射率为 1.340。

在光波长为 $1.55 \mu\text{m}$,温度变化范围为 $20 \sim 90^\circ\text{C}$ 时,椭圆孔 PCF 的限制损耗如图 6 所示。由图 6 可知,随温度的增加椭圆孔 PCF 限制损耗线性减小,光纤对光场束缚能力增强。温度从 20°C 增大到 90°C ,光纤损耗从 25.8 dB/m 减小至 5.84 dB/m ,直线拟合表达式为 $P = -0.279T + 29.067$,拟合度为 0.949,填充磁流体 PCF 的温度敏感度约为 $-0.279 \text{ dB}/^\circ\text{C}$,优于文献[7]中报道的敏感度。

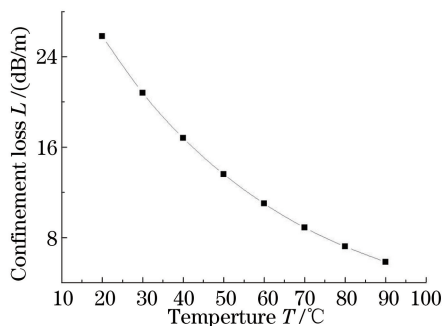


图 6 填充磁流体 PCF 的限制损耗随温度的变化

Fig. 6 Variation of confinement loss of PCF filled with MF versus different temperatures

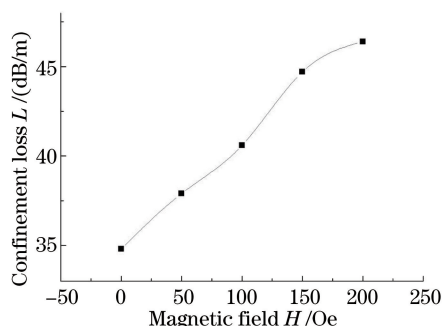


图 7 填充磁流体 PCF 限制损耗随磁场的变化

Fig. 7 Variation of confinement loss of PCF filled with MF versus magnetic field

图 7 为填充磁流体椭圆 PCF 的限制损耗随磁场的变化情况。由图 7 可知,当磁场从 0 增大到 200 Oe 时,椭圆孔 PCF 的限制损耗变化可达 10 dB 左右。直线拟合表达式为 $P = 0.06H + 34.88$,拟合度为 0.986,磁场灵敏度为 0.06 dB/Oe 。

4 结 论

利用 COMSOL 软件模拟分析了在圆孔和椭圆孔 PCF 空气孔中填充磁流体之后 PCFs 的模式和损耗特性的变化情况,分析了结构参量对 PCF 填充磁流体之后损耗灵敏度的影响,分析比较了两类 PCF 填充磁流体之后的损耗灵敏度情况。模拟结果表明:填充磁流体之后光子晶体光纤基模折射率变大,模场面积增大,损耗增加;PCF 的填充比越大,填充磁流体之后 PCF 损耗灵敏度越大;当填充磁流体的折射率在 $1.34 \sim 1.44$

范围内变化时,圆孔 PCF 最大损耗灵敏度为 4386.854 dB/m,椭圆孔 PCF 最大损耗灵敏度为 20652.38 dB/m,椭圆孔 PCF 的最大损耗灵敏度约是圆孔 PCF 的 4 倍。此外,在椭圆孔 PCF 空气孔中填充磁流体后获得的温度灵敏度为 -0.279 dB/°C,磁场灵敏度为 0.06 dB/Oe。因此,采用在椭圆孔 PCF 中填充合适折射率磁流体的方式设计光纤传感器,可以提高传感器的灵敏度。

参 考 文 献

- 1 Yang Yuanhong, Wang Huan, Yang Fuling, *et al.*. Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0806004.
杨远洪, 王欢, 杨福铃, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0806004.
- 2 Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of a Mach-Zehnder interferometer based on directly photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0505008.
毕卫红, 申远, 刘强, 等. 直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0505008.
- 3 Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zhu Hongbin, *et al.*. Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506002.
付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506002.
- 4 Huang Y W, Hu S T, Yang S Y, *et al.*. Tunable diffraction of magnetic fluid films and its potential application in coarse wavelength-division multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1867-1869.
- 5 Pu S, Chen X, Chen Y, *et al.*. Fiber-optic evanescent field modulator using a magnetic fluid as the cladding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(9): 093516.
- 6 Miao Yiping, Yao Jianquan. Temperature sensitivity of microstructured optical fiber filled with ferrofluid[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 221-229.
苗银萍, 姚建铨. 基于磁流体填充微结构光纤的温度特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 221-229.
- 7 Zhao Y, Zhang Y. Research on temperature and magnetic field sensing characteristics of photonic crystal fiber filled with magnetic fluid[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2014, 56(4): 831-834.
- 8 Miao Y, Liu B, Zhang K, *et al.*. Temperature tunability of photonic crystal fiber filled with Fe_3O_4 nanoparticle fluid[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(2): 021103.
- 9 Zu P, Chan C C, Gong T, *et al.*. Magneto-optical fiber sensor based on bandgap effect of photonic crystal fiber infiltrated with magnetic fluid[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(24): 241118.
- 10 Gao R, Jiang Y, Abdelaziz S. All-fiber magnetic field sensors based on magnetic fluid-filled photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1539-1541.
- 11 Yang S Y, Chieh J J, Horng H E, *et al.*. Origin and applications of magnetically tunable refractive index of magnetic fluid films[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(25): 5204-5206.