

基于磁性聚合物薄膜的光纤磁场传感探针

李敏*, 尹辑文**

赤峰学院物理与电子信息工程学院, 内蒙古 赤峰 024000

摘要 为了获得一个高灵敏度法布里-珀罗干涉仪光纤磁场传感探头,采用紫外光固化方法在单模光纤端面集成一个弧形磁性聚合物薄膜。利用条形磁铁作为场源,对干涉仪的腔长和折射率进行调制,对干涉峰峰值波长位置进行监测,实现对磁场强度的传感探测。将磁铁分别垂直和平行于传感探头放置,实验测得传感结构的灵敏度分别为 $46.77 \text{ pm}\cdot\text{mT}^{-1}$ 和 $56.37 \text{ pm}\cdot\text{mT}^{-1}$ 。该传感器具有成本低、制作方便、灵敏度高、稳定性好等特点,在生物医疗、信息技术等领域有着广泛的应用前景。

关键词 光纤光学; 法布里-珀罗干涉仪; 磁场; 矢量

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1106002

Fiber Magnetic Field Sensing Probe Based on Magnetic Polymer Thin Film

Li Min*, Yin Jiwen**

School of Physics and Electronic Information Engineering, Chifeng College, Chifeng, Inner Mongolia 024000, China

Abstract To fabricate a high-sensitivity fiber magnetic field sensing probe based on a Fabry-Pérot interferometer, an arc magnetic polymer thin film was integrated on the end face of a single-mode fiber using the UV curing method. Strip magnet was used as the field source to modulate the cavity length and refractive index of the interferometer. By monitoring the wavelength position of the interference peak, the magnetic field intensity was detected. The magnets were placed vertical and parallel to the sensing probe, and the corresponding sensitivities of the sensing structures were $46.77 \text{ pm}\cdot\text{mT}^{-1}$ and $56.37 \text{ pm}\cdot\text{mT}^{-1}$. The sensor has high sensitivity, good stability, and wide application prospects in the various fields, including biological medicine and information technology. Further, the sensor is inexpensive and can be conveniently manufactured.

Key words fiber optics; Fabry-Perot interferometer; magnetic; vector

OCIS codes 060.2370; 120.3180; 050.2230

1 引言

磁场信息与人类的生活息息相关,被广泛应用于信息技术、生物医疗及航空航天等领域中,因此,精准探测磁场的强度和方向具有重要的研究意义。目前,已研发出各式各样的磁场传感器^[1-4],并将其用于环境磁场的传感探测,如磁阻效应、霍尔效应磁场传感器等。在各种材料中,光纤因体积小、成本低、耐高压、耐腐蚀等优点受到研究者的密切关注^[5-10]。然而,由于光纤本身是由二氧化硅构成的,因此大多数光纤传感器对环境中的磁场变化并不敏感。近年来,已有不少研究者将新材料与光纤结合,

制备出新型传感结构,并将其用于磁场强度的测量^[11-22]。2012年, Li等^[12]首次将磁流体与微光纤谐振器结合制备光纤磁场传感器,其谐振波长随外加磁场的变化呈现出规律性变化。同年, Zu等^[13]将磁流体填充到光子晶体光纤的气穴中,将磁流体与光子晶体光纤可调谐光子带隙效应相结合,制备出一个高灵敏度磁场传感器,其灵敏度为 $1.56 \text{ nm}\cdot\text{Oe}^{-1}$ ($1 \text{ Oe} \approx 79.6 \text{ A/m}$)。2013年, Gao等^[14]也制备了基于磁流体填充光子晶体光纤的全光纤磁场传感器,其分辨率高达 0.09 Oe 。此外也有研究人员将磁流体与空芯光纤^[15-16]、无芯光纤^[17-18]和光纤布拉格光栅^[19]等独特结构相结合,制备光纤磁场

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-07-09; 录用日期: 2019-07-22

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY19214)

* E-mail: phdlimin@163.com; ** E-mail: yinjiwen1962@126.com

强度传感器,这些光纤磁场传感器对磁场表现出良好的灵敏度。然而,当外加磁场的强度达到一定数值时,分散在磁流体中的磁性粒子会发生团簇现象。团簇会导致磁流体的折射率发生改变^[20],从而导致传感器的传感性能受到影响。而磁致伸缩材料能很好地避免磁流体在强磁场中的团簇现象,但该类传感结构的制造工艺非常复杂,而且成本较高^[21-23]。

本文提出一种基于磁性聚合物薄膜的探针式光纤磁场传感结构。该结构采用紫外光固化法在单模光纤端面集成了一个磁性 SU-8 光刻胶薄膜,聚合物薄膜与光纤结合形成了一个双光束法布里-珀罗干涉仪光纤磁场传感探头。经紫外光曝光和热处理的磁性聚合物薄膜制备过程简单,成本较低,具有良好的稳定性,能有效地避免团簇现象。切平的光纤端面与磁性聚合物薄膜的表面构成了干涉仪的两个反射镜,入射光束在两个镜面分别反射,干涉叠加形成最终的反射干涉光谱。由于磁性纳米粒子具有超顺磁性特性,因此在外磁场作用下法布里-珀罗干涉仪的腔长和折射率将发生改变,从而引起反射干涉光谱中干涉峰中心波长位置发生移动,最后通过监测干涉谱波峰(谷)的移动得到该结构的磁场响应特性。这里选择两个特殊位置进行监测,分别监测了传感探头平行和垂直于磁铁放置时的响应特性,得到相应的磁场强度灵敏度为 $56.37 \text{ pm} \cdot \text{mT}^{-1}$ 和 $46.77 \text{ pm} \cdot \text{mT}^{-1}$ 。实验结果表明,腔长度的变化既

与磁场强度有关又与磁场的方向有关。该类传感器具有制作简单、成本低、重复性好、线性度好等特点,可广泛应用于科研、生产和社会生活等方面。

2 传感探针的制备和基本理论

配置磁性聚合物溶液。将质量分数为 5% 的 Fe_3O_4 纳米粒子(直径为 10 nm 左右)分散在 SU-8 光刻胶(GM 1070)中,分散后将混合溶液置于超声搅拌器中震荡 2 h,使 Fe_3O_4 纳米粒子均匀分散在 SU-8 光刻胶中,获得均匀的磁性聚合物溶液,超声所用的频率为 40 kHz。示意图如图 1(a)所示。

在光纤端面集成一层弧形的磁性聚合物薄膜。将端面切平的单模光纤浸入已配置好的磁性聚合物溶液中。将光纤缓慢地从溶液中提起,当光纤从溶液拉出后,由于表面张力的存在,光纤端面形成了一层完美的弧形磁性薄膜,如图 1(b)所示。

将集成了弧形磁性聚合物薄膜的光纤置于温控箱(勤卓,CK-80G)内进行加热烘干,使磁性聚合物薄膜溶液中的溶剂挥发。温控箱的温控过程如下: $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 时加热 15 min, $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 时加热 40 min。

将磁性聚合物薄膜置于紫外光源(UVLED, Xp-104)下进行曝光,紫外光源经物镜($NA = 0.8$)聚焦于光纤端面的磁性聚合物薄膜上,获得一个探针式光纤磁场传感结构,如图 1(c)所示。紫外光的波长为 $\lambda = 355 \text{ nm}$,辐照光强为 $9000 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

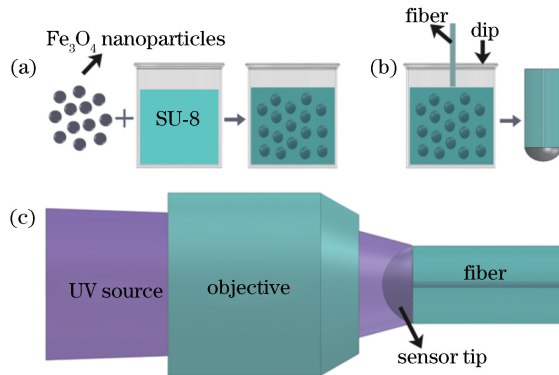


图 1 传感探针制备过程示意图。(a)磁性 SU-8 光刻胶溶液的制备;(b)磁性聚合物薄膜与光纤集成;(c)紫外光源对磁性聚合物薄膜曝光

Fig. 1 Diagrams of fabrication process of sensing probe. (a) Fabrication of magnetic SU-8 photoresist solution; (b) integrated magnetic polymer thin film and optical fiber; (c) exposure of magnetic polymer thin films by ultraviolet light source

图 2(a)为探针式光纤磁场传感结构的显微照片。从图中可以看到,光纤端面形成了一个完美的弧形磁性薄膜,由于 SU-8 光刻胶具有很好的自平整功能,因此磁性薄膜的表面非常光滑,实验测得磁性薄膜中心位置的最大厚度为 $50 \mu\text{m}$ 。弧形磁性薄

膜和光纤端面形成一个双光束干涉的法布里-珀罗干涉仪。该干涉仪经环形器分别与宽带光源(安扬, SC-5-FC)和光纤光谱仪(横河, AQ6370D)连接,当光强为 E_0 的光束从单模光纤入射,在光纤端面和磁性聚合物薄膜表面分别发生反射,反射光的光强分别为

E_1 和 E_2 , 两束反射光干涉叠加形成该探针式光纤磁场传感器的反射干涉谱, 光谱仪记录该结构的反射干

涉谱, 如图 2(b) 所示。从图中可以看到, 该结构干涉谱的损耗低, 干涉峰的最大对比度约为 13 dB。

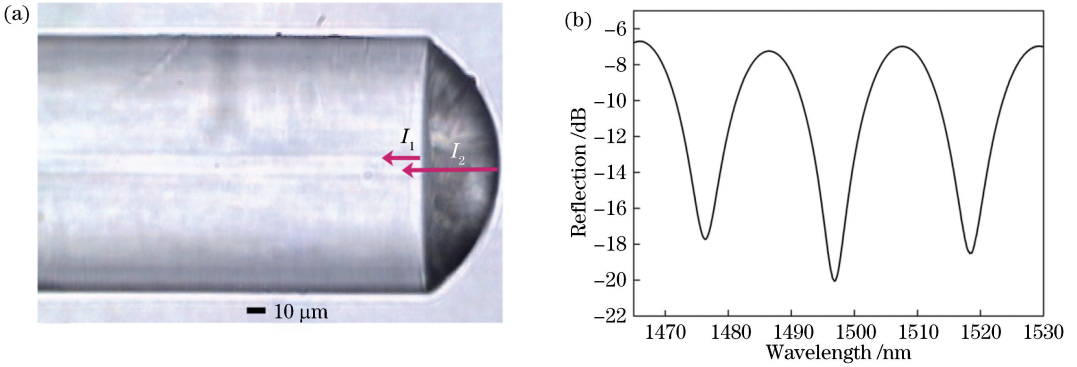


图 2 探针式光纤磁场传感结构的光学图片和反射干涉谱。(a) 光学图片侧视图; (b) 反射干涉谱

Fig. 2 Optical image and reflection interferometric spectrum of optical fiber magnetic field sensing probe structure.

(a) Side view of optical image; (b) reflection interferometric spectrum

假设光纤、磁性薄膜和空气的折射率分别为 n_1 、 n_2 和 n_3 , 腔长为 L 。入射光在光纤端面和磁性薄膜表面均发生菲涅耳反射, 反射光束干涉形成该结构的反射干涉谱。根据菲涅耳反射原理可知, 反射面的反射系数很低时, 高阶反射光场的电场强度低于 0.1%, 即可忽略高阶项, 因此可认为提出的光纤传感探头的反射光场近似等于两个反射面的一阶反射电场之和。入射光在第一个面反射的光电场分量 E_1 表示为

$$E_1 = \sqrt{R_1} E_0, \quad (1)$$

式中: E_0 为入射光的电场分量, R_1 为第 1 个面的反射系数。透射光在磁性薄膜内传输 L 距离后到达第 2 个反射面, 并在第 2 个面发生反射与透射。第 2 个面的反射光向后传输 L 距离后又在第 1 个面透射返回到光纤中, 透射电场 E_2 可以表示为

$$E_2 = (1 - R_1) \sqrt{R_2} \exp(-jLn_2 4\pi/\lambda + j\pi), \quad (2)$$

式中: R_2 为第 2 个面的反射系数。因此, 传感探头最终的反射光强分布 $I(\lambda)$ 可以表示为

$$I(\lambda) = R_1 + (1 - R_1)^2 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} (1 - R_1) \cos(4\pi Ln_2/\lambda). \quad (3)$$

根据 (3) 式, 传感探头干涉峰的中心波长位置 λ_m 可以表示为

$$\lambda_m = \frac{4n_2 L}{2m + 1}, \quad (4)$$

式中: m 为干涉峰的干涉级次。在没有磁场作用的情况下, 磁性 SU-8 光刻胶弧形薄膜中纳米粒子的磁矩方向是随机分布的。当将传感探头置于磁场环境中时, 分散在 SU-8 光刻胶中的 Fe_3O_4 纳米颗粒被磁化, 纳米粒子沿磁场磁矩取向发生变化, 从而导

致磁性聚合物薄膜的折射率发生改变。同时, 在磁场作用下, 弧形磁性薄膜也将发生形变, 即对法布里-珀罗干涉仪的腔长 L 进行调制。(1) 式表明, 干涉峰的中心波长与磁性聚合物薄膜的折射率和干涉仪的腔长均成正比。因此, 利用外磁场对探针式磁场传感结构的折射率和腔长进行调制, 从而使干涉谱中干涉峰中心波长发生漂移。通过监测反射干涉谱中干涉峰的中心波长位置可以实现磁场强度的高灵敏传感探测。

3 分析与讨论

为了研究这种探针式光纤传感器的磁场响应特性, 将光纤传感探针与高斯计 (WT10C) 的探头牢牢地绑定在一起, 并将绑定后的结构置于磁铁所提供的磁场中。用高斯计实时记录探针处磁场强度的大小。光纤传感探针传感特性的测试装置如图 3 所示。光纤传感探针经环形器分别与宽带光源和光谱仪连接。宽带光源提供带宽为 500 nm 的光束, 波长范围为 1200~1700 nm, 光束经光学环形器后在光纤探针的两个端面发生反射, 两束反射光干涉叠加形成该结构的反射干涉谱。光谱仪接收并记录干涉谱的数据。

实验中, 将条形磁铁分别与光纤传感探针垂直 (方向 1) 和平行 (方向 2) 放置, 测量传感探头的磁场强度响应特性。将磁铁平行于光纤传感探头放置, 如图 3 中方向 2 所示。图 4 为磁场与光纤传感探头相互作用的示意图。矩形磁铁的磁场在三维空间的分布关于中心轴线对称, 并且在轴线上, 当磁场强度的变化范围为 0~0.03 T 时, 该范围内的磁场强度

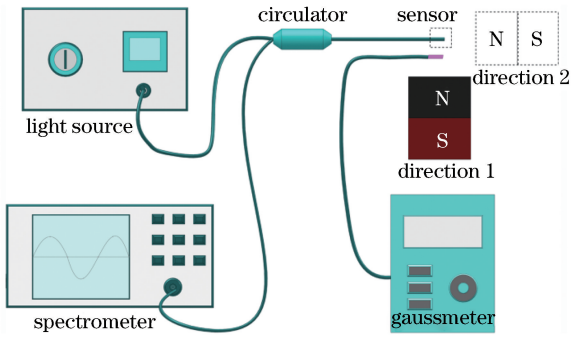


图 3 传感器传感特性的测试装置示意图

Fig. 3 Diagram of device for measuring sensing characteristics of sensor

随距离变化得比较均匀。因此,磁铁端部测试位置的磁场梯度差异对测试结果的影响比较小,可忽略不计^[24]。

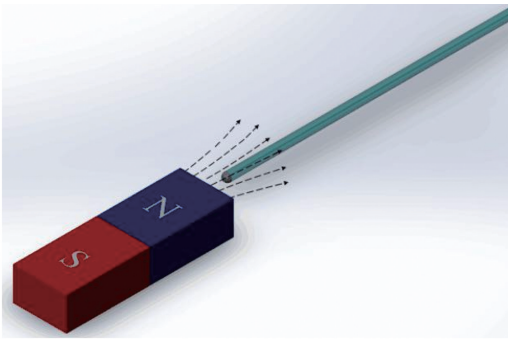


图 4 磁铁与光纤传感探针相互作用示意图

Fig. 4 Diagram of interaction between magnetic field and fiber sensing probe

在磁场作用下,弧形磁性聚合物薄膜的折射率随着磁场强度的增加而逐渐增大^[20]。同时,由于 Fe_3O_4 纳米粒子的顺磁效应,弧形磁性薄膜受到磁场的吸引发生形变,使得腔长减小,如图 5(a)所示。根据(3)式可得,磁性薄膜折射率 n_2 和腔长 L 增大均使得反射光谱红移。调节磁铁与光纤传感探头的相对距离,使磁场强度从 0 mT 以 5 mT 为一个步长变化到 35 mT,每个磁场强度下的反射光谱由光谱仪记录。实验结果表明,随着磁场的增加,光谱逐渐红移。当磁场强度增加到 35 mT 后,逐渐减小磁场强度,此时反射光谱开始蓝移。当磁场强度减小到 0 mT 时,反射干涉谱回到了初始位置。

将磁铁垂直于光纤传感探头放置,如图 3 中方向 1 所示。使磁铁沿着垂直于探头的方向移动,改变了磁场强度的大小。当磁铁逐渐靠近探头时,探头处的磁场强度逐渐增大,此时,传感探头的腔长逐渐减小而折射率逐渐增大,探头结构形变如图 5(b)所示。根据(4)式可知,腔长 L 减小和折射率 n_2 增

大分别使得干涉峰的中心波长蓝移和红移。实验结果表明,随着磁场强度的增大,干涉峰逐渐向短波长方向移动。因此,可推断出该过程中腔长的变化起主要作用。继续减小磁场强度到 0,干涉谱再次回到了初始位置。因此本结构具有较好的可重复性。

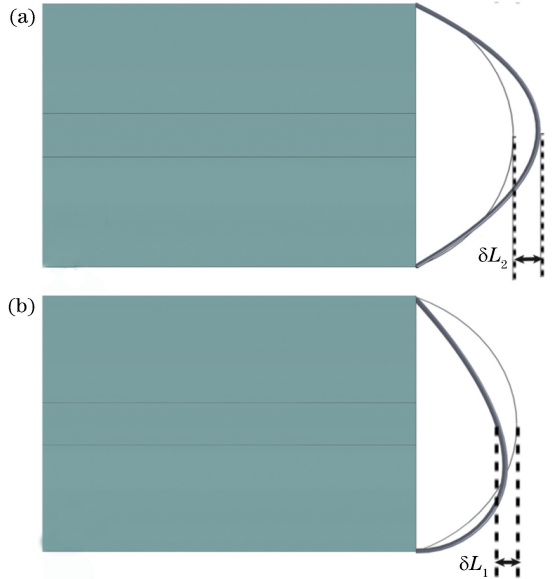


图 5 磁场作用下法布里-珀罗腔的形变示意图(细线和粗线分别代表薄膜未形变和形变)。(a)磁铁位于方向 2;(b)磁铁位于方向 1

Fig. 5 Deformation diagram of Fabry-Perot cavity under magnetic field (Thin lines and thick lines represent the undeformed and deformed thin films, respectively). (a) Magnet is located in direction 2; (b) magnet is located in direction 1

图 6(a)为磁铁置于方向 1 时,传感结构的响应特性谱线。为了给出详细信息,对波长在 1464~1486 nm 范围内的干涉峰进行详细监测。图中实线和虚线分别代表磁场强度增大和减小两个过程。当磁场强度在 0~30 mT 之间以 10 mT 为一个步长变化时,峰值中心波长移动了 1.6 nm,且在相同磁场强度处,两个过程的干涉峰中心波长吻合得较好,不存在明显的磁滞现象。进行 3 次重复实验,并计算每个磁场强度处干涉峰中心波长的平均值及测量的误差,结果如图 6(b)所示。对干涉峰中心波长位置进行线性拟合,结果表明,磁铁位于方向 1 和方向 2 时,传感探头的磁场强度灵敏度分别达到了 $46.77 \text{ pm}\cdot\text{mT}^{-1}$ 和 $56.37 \text{ pm}\cdot\text{mT}^{-1}$,线性度分别达到了 0.99647 和 0.99788。

4 结 论

利用紫外光固化的方法在光纤端面集成磁性聚

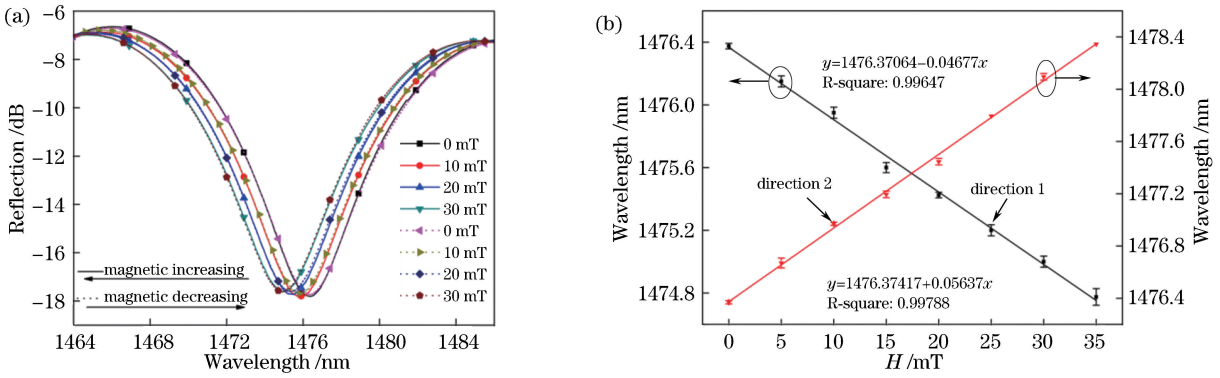


图 6 磁场强度增加和减小两个过程。(a)反射干涉谱随磁场强度的变化;(b)不同磁场强度对应的干涉峰中心波长位置的拟合
Fig. 6 Two processes of increasing and decreasing the strength of the magnetic field. (a) Reflection interference spectrum versus change of magnetic field intensity; (b) fitting results of interference peak positions corresponding to different magnetic field intensities

合物薄膜,获得了一个高灵敏度法布里-珀罗干涉仪光纤磁场强度传感探头。将磁铁垂直和平行于探头放置时,传感探头的磁场强度灵敏度分别达到了 $46.77 \text{ pm} \cdot \text{mT}^{-1}$ 和 $56.37 \text{ pm} \cdot \text{mT}^{-1}$ 。实验结果表明,传感探头的灵敏度不仅与磁场强度大小有关,还与磁场的方向有关。该传感结构制备过程简单、成本低、灵敏度高,并具有很好的稳定性,在生产生活及科研领域有着重要的应用前景。

参 考 文 献

[1] Liu Q, Zhou L, Zhou Y. Phase shift of optical fiber sensor coated with ZnO based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0122002.
刘奇,周力,周雅. 基于混合粒子群优化算法的 ZnO 镀膜光纤传感器的相位偏移[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0122002.

[2] Chen Q Q, Tang Y, Wang K N, *et al.* Characteristic analysis of correlation interference signals in optical wedge type fiber Fabry-Perot sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110603.
陈青青,唐瑛,王可宁,等. 光楔式光纤法布里-珀罗传感器相关干涉信号特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110603.

[3] Hu Y H, Dong H Y, Jiang C, *et al.* Multifunctional optical fiber sensor based on a hard plastic cladding fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070605.
胡义慧,董航宇,江超,等. 硬塑料包层光纤构成的多功能光纤传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070605.

[4] Li P C, Liu K, Jiang J F, *et al.* Research on polarization control of distributed optical fiber sensing system based on FPGA [J]. Chinese Journal of

Lasers, 2018, 45(5): 0510002.
李鹏程,刘琨,江俊峰,等. 基于 FPGA 的分布式光纤传感系统偏振控制研究[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510002.

[5] Jiang L, Yang J, Wang S, *et al.* Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity [J]. Optics Letters, 2011, 36(19): 3753-3755.

[6] Gu B B, Yin M J, Zhang A P, *et al.* Optical fiber relative humidity sensor based on FBG incorporated thin-core fiber modal interferometer [J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4140-4146.

[7] Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing [J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 1007-1009.

[8] Hu T Y, Wang Y, Liao C R, *et al.* Miniaturized fiber in-line Mach-Zehnder interferometer based on inner air cavity for high-temperature sensing [J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5082-5084.

[9] Lu P, Xu Y P, Baset F, *et al.* In-line fiber microcantilever vibration sensor [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(21): 211113.

[10] Ma J, Jin W, Ho H L, *et al.* High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2493-2495.

[11] Sun L, Jiang S, Marciante J R. All-fiber optical magnetic-field sensor based on Faraday rotation in highly terbium-doped fiber [J]. Optics Express, 2010, 18(6): 5407-5412.

[12] Li X L, Ding H. All-fiber magnetic-field sensor based on microfiber knot resonator and magnetic fluid [J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5187-5189.

[13] Zu P, Chan C C, Gong T X, *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.
- [14] 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.
- [15] Wang H T, Pu S L, Wang N, *et al.* Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding[J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3765-3768.
- [16] Chen Y F, Han Q, Liu T G, *et al.* Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode-multimode-single-mode structure and magnetic fluid [J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 3999-4001.
- [17] Zu P, Chan C C, Lew W S, *et al.* Magneto-optical fiber sensor based on magnetic fluid [J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 398-400.
- [18] Lin W, Miao Y P, Zhang H, *et al.* Fiber-optic in-line magnetic field sensor based on the magnetic fluid and multimode interference effects [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(15): 151101.
- [19] Zheng J, Dong X Y, Zu P, *et al.* Intensity-modulated magnetic field sensor based on magnetic fluid and optical fiber gratings [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(18): 183511.
- [20] Yang S Y, Chen Y F, Horng H E, *et al.* Magnetically-modulated refractive index of magnetic fluid films [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(26): 4931-4933.
- [21] Yang M H, Dai J X, Zhou C M, *et al.* Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20777-20782.
- [22] Dai Y T, Yang M H, Xu G, *et al.* Magnetic field sensor based on fiber Bragg grating with a spiral microgroove ablated by femtosecond laser[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 17386-17391.
- [23] Rao C N, Nakate U T, Choudhary R J, *et al.* Defect-induced magneto-optic properties of MgO nanoparticles realized as optical-fiber-based low-field magnetic sensor[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(15): 151107.
- [24] Gou X F, Yang Y, Zheng X J. Analytic expression of magnetic field distribution of rectangular permanent magnets [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(3): 297-306.