

基于磁流包覆冷却拉锥全光纤磁场传感器特性研究

汪 Chengcheng¹, 范荣华¹, 吴根柱^{1,2,*}, 彭保进¹, 张峰¹

¹ 浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华 321004;

² 浙江师范大学行知学院, 浙江 金华 321004

摘要 为提高光纤传感器磁场检测中的敏感度,进一步实现弱磁场环境中的高精度场强勘测,提出一种基于磁流包覆与冷却拉锥透射式全光纤高灵敏磁场传感器,拉锥过程采用间歇式停顿冷却技术,可更加便捷获得高质量干涉谱,减缓光子晶体光纤空气孔塌缩,制作工艺简单,具有可操纵性强、灵敏度高、损耗小等优势,实现了高灵敏磁场环境实时在线检测,并对传感器的变温影响进行了讨论。实验结果表明,光子晶体光纤的拉锥长度为 5.5 mm、腰椎直径为 75 μm 时,可得到良好的干涉光谱,在 0~78 Oe (1 Oe \cong 79.578 A \cdot m⁻¹) 磁场范围内,灵敏度达 95 pm/Oe,线性拟合度为 98.31%。

关键词 光纤光学; 光子晶体; 磁流体; 光纤冷却拉锥; 磁场传感

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.010602

Characteristics of All-Optical-Fiber Magnetic Field Sensor Based on Magnetic Fluid Coating and Cooling Tapering

Wang Chengcheng¹, Fan Ronghua¹, Wu Genzhu^{1,2,*}, Peng Baojin¹, Zhang Feng¹

¹ College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;

² Xingzhi College, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract This paper proposes an all-optical-fiber high-precision magnetic field sensor based on magnetic fluid coating and cooling tapering to improve the sensitivity of optical fiber sensors in magnetic field detection and realizes high-precision real-time monitoring of field intensity under a weak magnetic field. The intermittent cooling method in the tapering process enhances the quality of the interference spectrum conveniently and slows the air-hole collapse of the photonic crystal fiber. Because of its simple manufacturing process, strong maneuverability, high sensitivity, and low degree of loss, the sensor realizes real-time online detection in a high-sensitivity magnetic field. Finally, the influence of the temperature variation of the sensor is discussed. Experimental results show that the photonic crystal fiber obtains a good interference spectrum at a tapering length of 5.5 mm and waist diameter of 75 μm . The sensor exhibits a highly linear response to external magnetic fields ranging from 0 to 78 Oe (1 Oe \cong 79.578 A \cdot m⁻¹) with a sensitivity of 95 pm \cdot Oe⁻¹. The degree of linear fitting is approximately 98.31%.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; magnetic fluid; fiber cooling tapering; magnetic field sensing

OCIS codes 060.2270; 060.2370; 060.2380; 060.2400

1 引言

近年来,磁场检测在军事、航空航天^[1]、化学检测、工业和电力传输等诸多领域应用愈加广泛。

磁流体^[2](MF)作为一种新型功能介质,具有法拉第效应^[3]、磁致折变效应^[4]等多种独特磁光特性,因此,许多基于 MF 的光学器件被相继研发,如可调谐慢光器件^[5]、可调谐电容器^[6]、光开关^[7]等。同时, MF 因液体流动性极易与光学光纤结合,基于 MF

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-06-25; 录用日期: 2019-07-01

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY19F050015, LY19F050014)

* E-mail: wugenzhu@zjnu.cn

的多种形式的光纤磁场传感器^[8-9]逐渐成为当今学者的研究热点。与传统器件相比, MF 与光纤融合而成的传感器件^[10]具有尺寸小、易集成、响应快^[11]等优点, MF 与多孔低损光子晶体光纤^[12] (PCF) 作用, 有望制造出灵敏度高、响应速度快的新型传感器件。2012 年, Li 等^[13]提出了一种基于微光纤结型谐振器与 MF 结合的磁场传感器, 可成功检测到 10 Oe (1 Oe $\hat{=}$ 79.578 A \cdot m⁻¹) 以上得磁场强度, 但谐振腔对光纤尺寸要求较高, 亚波长光纤制备困难, 操作难度较大。2015 年, Zhao 等^[14]提出了一种基于马赫-曾德尔干涉 (MZ) 式磁场传感器, 将单模光纤 (SMF) 与 PCF 融合拼接后填充 MF, 经电弧放电拉锥实现磁场探测, 在 100~600 Gs (1 Gs $\hat{=}$ 10⁻⁴ T) 检测范围内, 灵敏度提升至 16.04 pm/Gs, 分辨率为 0.62 Gs; 但由于锥区较短, 纤芯尺寸变化过快易导致机械强度降低、损耗大, 不适用于微弱磁场的相关监测。2016 年, Li 等^[15]在 SMF 间拼接双芯光纤, 利用飞秒激光微加工钻通双芯光纤单个纤芯, 将其浸入磁介质实现磁场测量, 提升了传感区受磁场环境影响的敏感程度, 但制造过程较复杂, 涉及到光刻或微加工技术。2017 年, Zhang 等^[16]将锥形细芯光纤 (TCF) 与多模光纤拼接制作全光纤磁场传感器, 在 40~160 Oe 范围内, 该传感器磁灵敏度为 -0.1039 dB/Oe。最近, 天津理工大学 Wang 等^[17]将 MF 选择性填充进 PCF 内部核心区域实现了磁场测量, 在 0~300 Oe 范围内该磁场传感器有很强的线性响应度, 灵敏度为 16.8 pm/Oe, 分辨率为 1.19 Oe, 但因精确注入 MF 的操作难度较高, 该传感器的制作难度大。在光纤磁场传感方面虽已取得许多预期结果, 但存在制造复杂, 稳健性低、易断裂等问题, 对器件的大量生产带来一定困难。针对以上不足, 本文提出一种操作性高、损耗低、制备简单、响应度快的新型全光纤锥形透射式磁场传感器, 并通过实验验证了该传感器的可行性。该结构在高精度弱磁场测量^[18]、磁光调制器等方面具有一定的应用价值。

2 传感原理及制备方案

2.1 传感原理

磁流体具有超顺磁性, 无外磁场情况下内部磁性颗粒磁矩取向随机, 整个净磁矩为零。添加外磁场后, 磁流体折射率随外界磁场强度的增加而增大, 满足朗之万函数, 即

$$n_{\text{MF}}(H) =$$

$$\begin{cases} n_0, & H < H_{c,n} \\ (n_s - n_0) \left[\coth\left(\alpha \frac{H - H_{c,n}}{T}\right) - \frac{T}{\alpha(H - H_{c,n})} \right], & H > H_{c,n} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{mH}{kT}, \quad (2)$$

式中: n_0 为外加磁场小于某个临界磁场强度时磁流体的折射率; $H_{c,n}$ 为临界磁场; n_s 磁流体饱和折射率; T 为热力学温度; H 为外加磁场强度; m 为磁性颗粒磁矩; k 为玻尔兹曼常数; α 为拟合参数。黏度也是流体流动的一种特性表征, 磁性颗粒磁化强度矢量总趋向于外磁场矢量方向。当涡流矢量与外磁场平行时, 磁性颗粒微电流环不切割磁力线, 不产生附加磁力矩, 外磁场对磁流体黏度无影响。

根据 MZ 干涉原理与 MF 折射率随磁场可调谐特性^[19]可知, 入射光经过第一个塌陷区时, 一部分光在 PCF 纤芯中以基模形式传播, 另一部分光被泄露至包层以高阶模形式传播, 当两束光传播至第二塌陷区时, 纤芯基模与包层高阶模耦合, 产生相位差, 形成 MZ 干涉, 自由光谱范围 (FSR) 可近似为^[20]

$$R_{\text{FSR}} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L}, \quad (3)$$

式中: Δn_{eff} 表示 PCF 纤芯与包层的有效折射率之差; λ 为波长; L 为传感区长度。因此, 干涉光强可用干涉方程表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda}\right), \quad (4)$$

式中: I 为总光强; I_1 、 I_2 分别为纤芯模、包层模光强。当相位等于 $(2m+1)\pi$ 时透射光谱波谷波长为

$$\lambda = \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L}{2m+1}, \quad (5)$$

式中: m 为正整数。当作用于传感段的外磁场增大时, MF 磁性粒子团簇呈链、液相分离, PCF 周围磁流体折射率随磁场的改变而改变, 有效折射率之差 Δn_{eff} 也发生改变, 干涉谷位移的计算式为

$$\Delta\lambda = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{2m+1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L}{2m+1} = \frac{2\Delta n L}{2m+1}, \quad (6)$$

式中: Δn 为磁流体内部有效折射率变化差值。谱线漂移量与磁流体对磁场的敏感程度、耦合点位置有关。

2.2 传感装置及制备

为实现高精度磁场在线检测, 所提出光纤磁场传感装置如图 1 所示。该传感器将 PCF (LMA-10, NKT Photonics) 拼接于两段 SMF 间。经光纤熔接

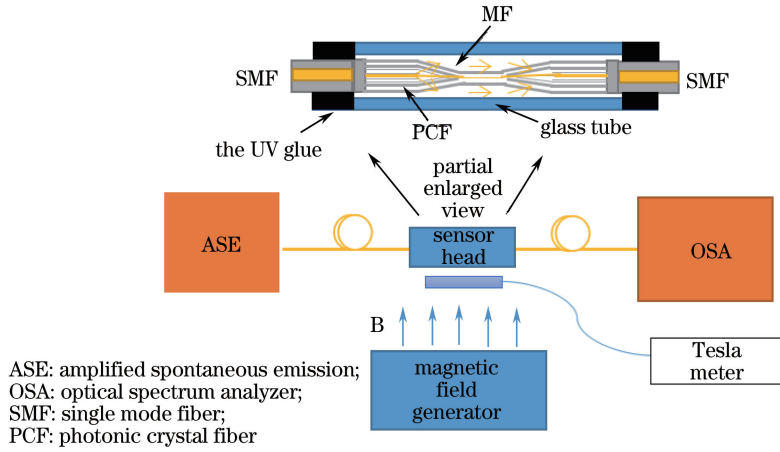


图 1 磁场传感实验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram of magnetic field sensing

机(KL-300T)在 SMF-PCF、PCF-SMF 端面进行放电熔接,图 2(a)为实验使用的 PCF 的截面,熔接过程如图 2(b)、2(c)所示。通过调整合适放电强度、放电时间使损耗降至最低,注意 PCF、SMF 涂覆层应在融合前完成剥离。实验采用谱宽为 1500~1610 nm,中心波长为 1550 nm 的宽带光源,入射光

通过 SMF-PCF-SMF 结构,传感区置于变化磁场间,特斯拉计与光纤同平面平行放置用于该处磁场测量,观察波长漂移变化作为测量相应磁场强度的计量指标。另一端连接光谱仪(AQ6375)。磁场检测系统搭建完成后,改变周围磁场强度,观察干涉谱移动,并记录数据。

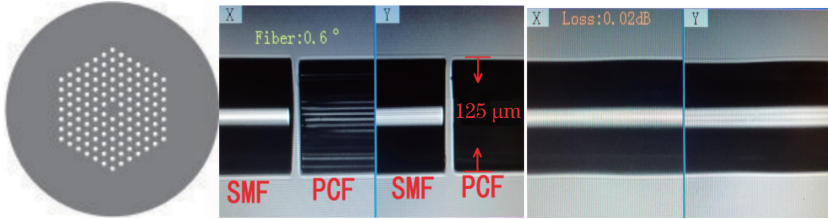


图 2 SMF-PCF 传感区显微图像。(a) PCF 截面图;(b) SMF、PCF 熔接前;(c) SMF、PCF 成功熔接

Fig. 2 Microimage of SMF-PCF sensing region. (a) Cross section of PCF; (b) Before welding of SMF and PCF; (c) after welding of SMF and PCF

利用光纤熔融拉锥系统(IPC-5000-SMT)调节合适 H_2 燃量、拉伸速度、拉锥时间等参数,拉锥过程中,每拉伸约 1 mm 长度时中止拉锥,退回火头,待其冷却至室温后继续拉伸,直至拉至预定长度,这种分段冷却拉锥能够制作出损耗小,长且均匀的光滑腰锥,且分段式拉锥更易于找到最佳长度。利用毛细管注射器将 MF 填充至内径 1 mm 的玻璃管中并用紫外固化胶密封,防止 MF 泄漏蒸发。本实验采用质量分数为 3.9% 的水基 Fe_3O_4 磁性流体(EMG605, Ferrotec),磁性颗粒直径约为 10 nm。

图 3 探究了不同拉锥长度时光谱的变化情况,随拉锥长度增加干涉谱自由光谱范围变小,消光比变小,损耗逐渐变大。熔融拉锥锥区直径越小,倏逝场越强,灵敏度越高,但长且过细的锥区会使干涉谱质量下降,为后期的解调带来不变,在填充磁流体时

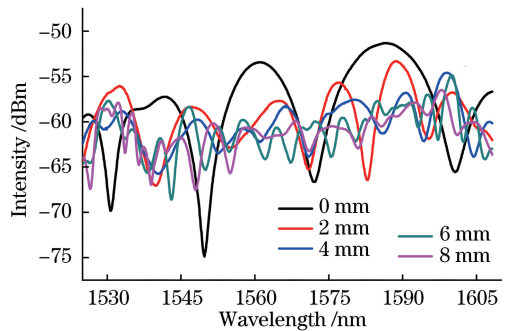


图 3 不同拉锥长度的透射光谱图

Fig. 3 Transmission spectra for different taper lengths

不易操作。为更直观探究冷却拉锥与手工电弧放电锥形态的区别,选取较大拉锥长度 8 mm(锥区直径为 $35.71 \mu m$)进行观测,图 4(a)、(b)分别为间歇冷却熔融拉锥、电弧放电拉锥 PCF 锥区显微图,可明

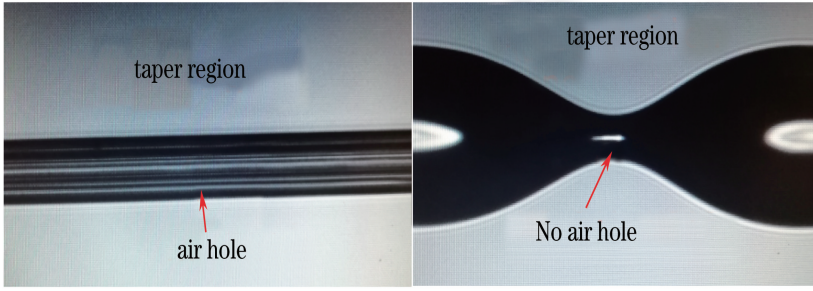


图 4 不同拉锥方式的锥形 PCF 显微图。(a)间歇冷却拉锥 PCF 锥区;(b)手动放电拉锥 PCF 锥区

Fig. 4 PCF micrographs of different tapering methods. (a) Intermittent cooling tapering PCF cone area; (b) manual discharge tapering PCF cone area

显看出间歇冷却拉锥 PCF 腰椎平缓,内部空气孔仍然保留,手动放电拉锥对应的腰椎陡峭,内部空气孔完全塌陷,易导致较大损耗。

3 结果分析与讨论

图 5 为选取 PCF 长 2.3 cm、拉锥长度 5.5 mm、拉锥后 PCF 直径 75 μm 时 PCF 冷却拉锥前后的透射谱,相比于普通电弧拉锥,冷却拉锥更容易实现稳定均匀的干涉谱,同时传感器自由光谱范围较小,可提高测量精度,对磁场变化更加敏感。图 6 是 MF

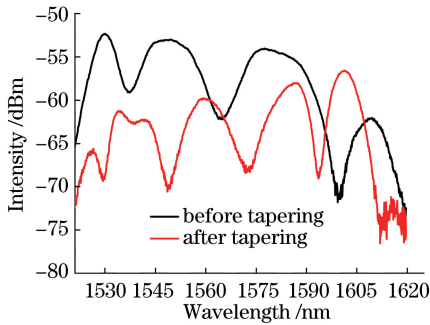


图 5 传感区拉锥前后透射光谱图

Fig. 5 Transmission spectra before and after tapering in sensing region

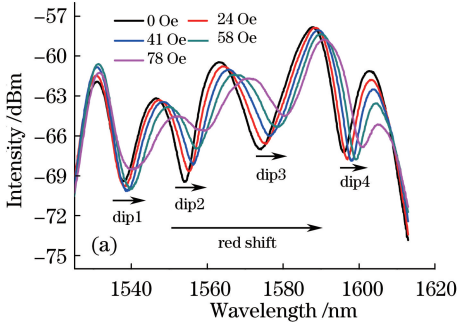


图 7 不同磁场强度下透射光谱。(a)总透射谱线;(b) dip3 处透射谱线

Fig. 7 Transmission spectra for different magnetic field intensities. (a) Total transmission spectra; (b) transmission spectra of dip3

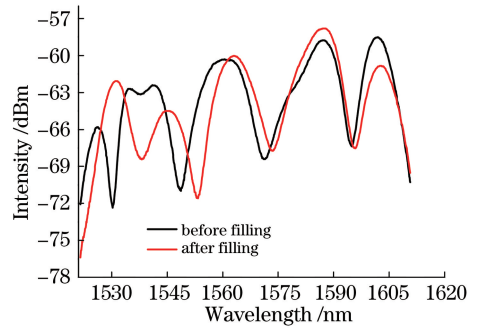
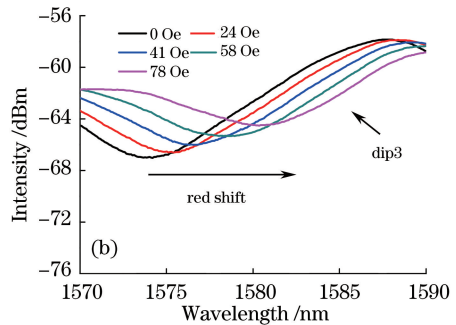


图 6 磁流体填充前后透射光谱

Fig. 6 Transmission spectra before and after magnetic fluid filling

包覆 PCF 前后 1510~1620 nm 波段的透射光谱,包覆磁流体前后光强衰减小,光在光纤中传播损耗小更利于后续传感测量。

外磁场由 0 Oe 增至 78 Oe,透射光谱如图 7 所示。外加磁场增加,管中 MF 粒子团簇成柱,谱线受磁场影响发生漂移。图 8 所示为 dip3 波谷谱线漂移情况,干涉谱的红移更加直观。由图 8 可知,1574~1582 nm 波段磁场强度由 0 Oe 升至 78 Oe,传感器波长灵敏度为 0.09508 nm/Oe,灵敏度高于之前报道^[14-17],线性拟合度达 98.31%。撤去外磁场



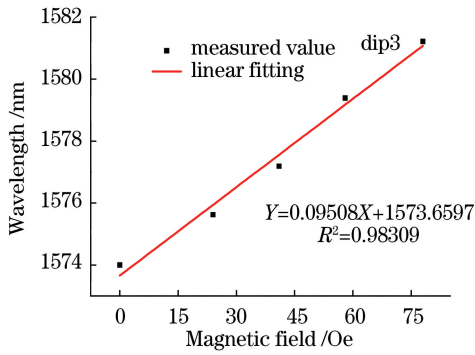


图 8 波长随磁场强度变化规律

Fig. 8 Variation of wavelength with magnetic field intensity

后,热运动会使磁性颗粒回归无规则状态,即完全退磁,磁流体磁化且不存在剩磁和矫顽力,即无磁滞效应产生。

此外,还探究了该传感器的温度特性,图 9 为不同温度下的透射光谱。由朗之万公式(1)和(2)式可知,温度降低导致磁流体有效折射率增大,干涉谱红移且消光,灵敏度为 $-0.04389 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,线性拟合度达 99.93%,如图 10 所示。在实际应用过程中,可以采用绝热材料封装或温度补偿技术来解决温度对于传感器的影响。

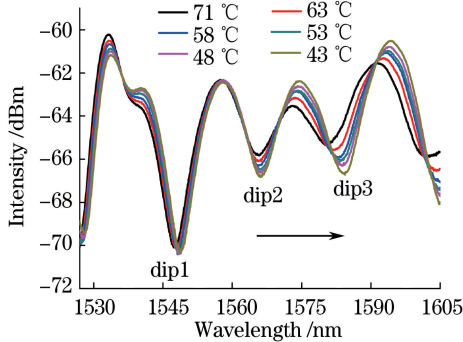


图 9 不同温度下透射光谱曲线

Fig. 9 Transmission spectra at different temperatures

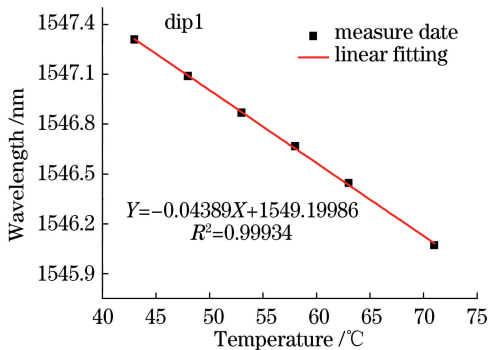


图 10 波长随温度变化规律

Fig. 10 Variation of wavelength with temperature

4 结 论

本文提出并制造了一种基于磁流体包覆与冷却拉锥的全光纤磁场传感器,灵敏度达 $95 \text{ pm}/\text{Oe}$,可用于弱磁场的实时在线检测。采用一种新型间歇性冷却拉锥技术容易获得稳定且均匀的干涉光谱,在一定程度上减缓了 PCF 内部气孔塌陷,不仅为后期解调提供方便,同时提高了传感器灵敏度。与传统电弧放电制作锥区传感相比,传感结构机械强度更强、传感区操作性高、稳健性好、灵敏度高。并对 PCF 拉锥前后, MF 填充前后谱线变化及温度影响进行讨论分析,成功制造出一种灵敏度高、响应速度快、线性度好、制作工艺简单的磁场传感器,在弱磁场调制、化学微检测及地质信息监测等领域具有良好发展前景。

参 考 文 献

- [1] Zhang Q, Liu Z Z, Qin F F, et al. Exploring optical resonances of nanoparticles excited by optical Skyrmion lattices[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7009-7022.
- [2] Guo Y Y, Yan F P, Liu S, et al. Characteristics investigation of high birefringent micro-structured optical fiber filled with magnetic fluid at $2 \mu\text{m}$ band [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (4): 0406003.
郭玉玉, 延凤平, 刘硕, 等. $2 \mu\text{m}$ 波段高双折射微结构磁流体光纤特性研究 [J]. 中国激光, 2018, 45 (4): 0406003.
- [3] Deng M, Huang C, Liu D H, et al. All fiber magnetic field sensor with ferrofluid-filled tapered microstructured optical fiber interferometer [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20668-20674.
- [4] Zhou S J, Zhang H C, Li Y Q. Research on high precision fiber magnetic field sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(11): 1011-1014.
周胜军, 张虎城, 李玉权. 高精度光纤磁场传感器的研究 [J]. 中国激光, 2003, 30(11): 1011-1014.
- [5] Pu S L, Dong S H, Huang J. Tunable slow light based on magnetic-fluid-infiltrated photonic crystal waveguides [J]. Journal of Optics, 2014, 16 (4): 045102.
- [6] Patel R, Mehta R V. Ferrodispersion: a promising candidate for an optical capacitor [J]. Applied Optics, 2011, 50(31): G17-G22.
- [7] Pu S L, Chen X F, Chen L J, et al. Tunable magnetic fluid grating by applying a magnetic field

- [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(2): 021901.
- [8] Benner R E, Barber P W, Owen J F, et al. Observation of structure resonances in the fluorescence spectra from microspheres[J]. Physical Review Letters, 1980, 44(7): 475-478.
- [9] Li X P, Ma R D, Xia Y J. Magnetic field sensor exploiting light polarization modulation of microfiber with magnetic fluid [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(9): 1620-1625.
- [10] Huang X, Liu Y B, Zhang J R. On the highest obtainable resolution of optical fiber sensors for measuring weak magnetic field[J]. Chinese Journal of Lasers, 1990, 17(1): 13-17.
黄旭, 刘延冰, 张金如. 关于光纤传感器测弱磁场的最高分辨率问题[J]. 中国激光, 1990, 17(1): 13-17.
- [11] Luo L F, Pu S L, Tang J L, et al. Reflective all-fiber magnetic field sensor based on microfiber and magnetic fluid[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18133-18142.
- [12] Wang C C, Zhang F, Wu G Z. The characteristics of an asymptotical porous-core photonic crystal fiber for terahertz wave guidance[J/OL]. Laser Technology, 2019-02-25 [2019-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20190225.1621.006.html>.
汪成程, 张峰, 吴根柱. 渐近式太赫兹多孔光子晶体光纤模式特性研究[J/OL]. 激光技术, 2019-02-25 [2019-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20190225.1621.006.html>.
- [13] 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.
- [14] Zhao Y, Wu D, Lü R Q. Magnetic field sensor based on photonic crystal fiber taper coated with ferrofluid [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 26-29.
- [15] Li Z Y, Liao C R, Song J, et al. Ultrasensitive magnetic field sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer with a magnetic fluid component[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): 197-201.
- [16] Zhang J Y, Qiao X G, Yang H Z, et al. All-fiber magnetic field sensor based on tapered thin-core fiber and magnetic fluid[J]. Applied Optics, 2017, 56(2): 200-204.
- [17] Wang W H, Miao Y P, Li Z, et al. Tunability of Hi-Bi photonic crystal fiber integrated with selectively filled magnetic fluid and microfluidic manipulation [J]. Applied Optics, 2019, 58(4): 979-983.
- [18] Guan C Y, Zhong X, Mao G P, et al. In-line Mach-Zehnder interferometric sensor based on a linear five-core fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 635-638.
- [19] Nallusamy N, Zu P, Raja R V J, et al. Degenerate four-wave mixing for measurement of magnetic field using a nanoparticles-doped highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. Applied Optics, 2019, 58(2): 333-339.
- [20] Layeghi A, Latifi H. [INVITED] Magnetic field vector sensor by a nonadiabatic tapered Hi-Bi fiber and ferrofluid nanoparticles [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 102: 184-190.