

激光与光电子学进展

基于磁致伸缩棒的干涉型微纳光纤磁场传感器

贾灵艳^{1,2}, 梁丽丽^{2*}, 谢飞², 王志达², 王辰², 王澳², 李国玉², 李燕^{2**}, 刘明生^{1,2,3}¹河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401;²邯郸学院信息技术研究所, 河北省光纤生物传感与通信器件重点实验室, 河北 邯郸 056005;³石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041

摘要 提出了一种干涉型微纳光纤磁场传感器,由微纳光纤干涉仪和 TbDyFe 超磁致伸缩棒构成,单模光纤经过熔融拉锥形成双锥型微纳光纤干涉仪,与 TbDyFe 超磁致伸缩棒平行固定封装,磁场作用下磁致伸缩棒和微纳光纤干涉仪发生轴向应变,引起干涉谱的波长漂移,形成波长编码型的光纤磁场传感器。实验结果表明,相同应变特性的微纳光纤干涉仪,磁致伸缩棒直径越小,磁场灵敏度越高,直径为 2 mm 的 TbDyFe 磁致伸缩棒组成的光纤磁场传感器灵敏度可以达到 0.178 nm/mT,该传感器结构简单,易于制备,成本低廉,响应快,可以实现微弱磁场的高灵敏探测。

关键词 传感器; 光纤传感; 微纳光纤干涉仪; 磁场传感; 超磁致伸缩棒

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220893

Interferometric Optical Microfiber Magnetic Field Sensor Based on Magnetostrictive Rod

Jia Lingyan^{1,2}, Liang Lili^{2*}, Xie Fei², Wang Zhida², Wang Chen², Wang Ao², Li Guoyu²,
Li Yan^{2**}, Liu Mingsheng^{1,2,3}¹School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;²Hebei Key Laboratory of Optical Fiber Biosensing and Communication Devices, Institute of Information Technology, Handan University, Handan 056005, Hebei, China;³Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, Hebei, China

Abstract An interferometric microfiber magnetic field sensor composed of a microfiber interferometer and a TbDyFe magnetostrictive rod is proposed. The microfiber interferometer was formed by tapering a single-mode fiber and placed in lateral contact with a TbDyFe magnetostrictive rod. Under the action of a magnetic field, the axial strain of the magnetostrictive rod and the microfiber interferometer causes a wavelength shift of the interference spectrum, which forms a wavelength coding fiber magnetic field sensor. The experimental results show that for the microfiber interferometers with the same strain characteristics, the smaller the diameter of the magnetostrictive rod is, the higher the magnetic field sensitivity is. The sensitivity of the fiber magnetic field sensor composed of TbDyFe magnetostrictive rod with a diameter of 2 mm can reach up to 0.178 nm/mT. The sensor has the advantages of simple structure, easy fabrication, low cost, and fast response. It can realize highly sensitive detection of weak magnetic field.

Key words sensors; optical fiber sensing; microfiber interferometer; magnetic field sensing; giant magnetostrictive rod

1 引言

磁场测量在生物医疗、地质勘测、国防、电力等领域都有重要的应用,各种各样的磁场传感器应运而生,比

如感应线圈磁强计^[1]、磁阻传感器^[2]、磁通门磁强计^[3]、质子磁力仪^[4]和光纤磁场传感器^[5-6]等。其中,光纤磁场传感器具有灵敏度高、抗电磁、耐腐蚀、体积小,可以灵活弯曲且成本低等特点,光波作为传感信号,易于实时动

收稿日期: 2022-02-04; 修回日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-03-29; 网络首发日期: 2022-04-08

基金项目 国家自然科学基金(62175055)、河北省自然科学基金(F2021109003)、河北省光纤生物传感与通信器件重点实验室(SZX2022010)、河北省教育厅高等学校科学技术研究项目(BJ2021093, QN2020533)、邯郸市科学技术研究与发展计划(20312904061)、邯郸学院校级项目(XZ2020303, XZ2021401, 16215, XZ2021108, 2017204)

通信作者: *liangli070118@163.com; **hdx0310@163.com

态监测和组网等^[7],应用前景十分广阔,因此光纤磁场传感器受到国内外广泛关注。从工作原理上大致分为四类:基于洛伦兹力的光纤磁场传感器^[8]、基于法拉第效应的光纤磁场传感器^[9]、基于磁流体的光纤磁场传感器^[10-11]和基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器^[12-14]。其中,基于磁致伸缩效应的光纤磁场传感器结构简单、可靠性高,成为目前研究比较多的一类光纤磁场传感器。

在磁场中,磁致伸缩材料的形状和大小会随着磁场强度的变化发生改变,撤去磁场后磁致伸缩退去。1980年,Yariv等^[15]首次提出将磁致伸缩材料镍(Ni)镀在光纤上,实现了微弱磁场的测量。传统的磁致伸缩材料有镍基合金(如:Ni,Ni-Co合金,Ni-Co-Cr合金)和铁基合金,其磁致伸缩系数在 $2 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ 之间,伸缩系数小,磁场测量能力有限。稀土磁致伸缩材料,例如铽镝铁(Tb-Dy-Fe)系合金系列,又叫 Terfenol-D,它的磁致伸缩系数在 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$,是镍基材料的40~50倍,因此又称为稀土超磁致伸缩材料,在磁场测量方面备受关注。2009年,Yang等^[16]首次基于磁控溅射方法在光纤布拉格光栅(FBG)刻蚀的侧圆上沉积了 TbDyFe 薄膜,在0~50 mT 区间上磁场灵敏度为 9×10^{-4} nm/mT。2015年,Zhang等^[17]提出了将 TbDyFe 与光纤法布里-珀罗干涉仪(EFFPI)结构结合测量磁场,在23~30 mT 范围内可实现8.55 nm/mT的超高灵敏度,在0~88 mT 的测量范围内灵敏度先增大后减小,但测量区间小,灵敏度差异较大。为了提高测量灵敏度和扩大测量区间,研究人员不断尝试不同的光纤器件与磁致伸缩材料的结合方法。

本文提出了一种基于微纳光纤干涉仪和超磁致伸缩材料 TbDyFe 的光纤磁场传感器,如图1所示,基于

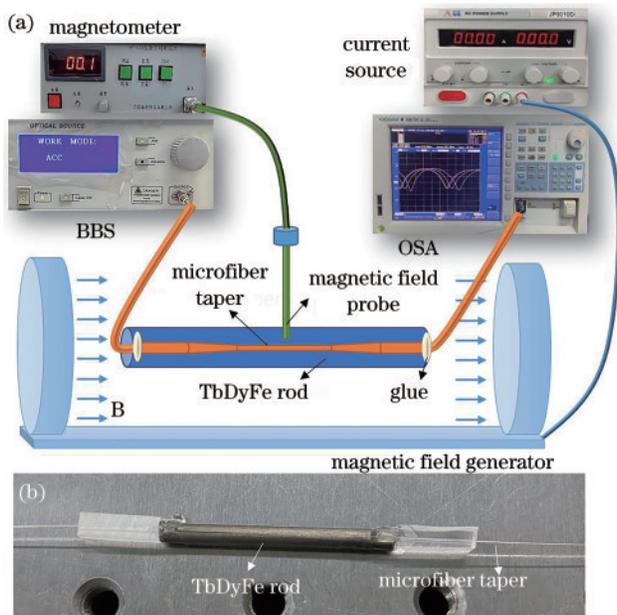


图1 光纤磁场传感器。(a)实验装置图;(b)实物图

Fig. 1 Optical fiber magnetic field sensor. (a) Experimental setup; (b) physical map

熔融拉锥方式制备微纳光纤干涉仪,其双锥区域与 TbDyFe 磁致伸缩棒平行固定封装,水平放置于磁场中。光纤一端连接宽带光源(BBS, AS3212BA2, B&A Technology, 香港),另一端连接光谱仪(OSA, AQ6370C, Yokogawa, 日本),实时记录输出端干涉谱型的变化。磁场发生器(PEM-30, 天杰磁电科技有限公司, 绵阳)的通电导线线圈产生磁场,通过调节可调节电流源(JP8010D, 无锡安耐斯电子科技有限公司, 无锡)来改变磁场大小,光纤磁场传感器敏感区附近放置磁场感测探头(PF-035, 力田磁电科技有限公司, 绵阳),实时显示光纤磁场传感器所在区域的磁场大小,并记录不同磁场强度对应的干涉谱型,基于微纳光纤干涉仪良好的应变特性实现磁场的高灵敏检测。对于直径为2 mm的 TbDyFe 磁致伸缩棒与直径为 $6.7 \mu\text{m}$ 的微纳光纤干涉仪组成的光纤磁场传感器,其灵敏度可以达到 0.178 nm/mT 。

2 基本原理

改变外加磁场大小,会导致磁致伸缩材料的内部分子结构发生变化,从而造成外部结构伸长或收缩。所产生的应变与外加磁场的关系^[18]表示为

$$\epsilon_T = \frac{\Delta L}{L} = C_i H^2, \quad (1)$$

式中: ϵ_T 为 TbDyFe 磁致伸缩棒的应变变量; ΔL 为 TbDyFe 磁致伸缩棒的伸长量; L 为 TbDyFe 磁致伸缩棒本身的长度; C_i 为 TbDyFe 的磁致伸缩系数,随着外加磁场 H 的增大而增大; H 为外加磁场的大小。在外加磁场的作用下,TbDyFe 磁致伸缩棒本身发生形变,导致跟其粘贴在一起的锥形微纳光纤也产生基本相同的应变。当微纳光纤干涉仪受到均匀的轴向应变 ϵ_T 时,会产生弹光效应,使得发生干涉的光纤基模和高阶模的有效折射率发生改变,干涉仪的干涉长度也会变化,导致微纳光纤干涉仪的干涉谱型发生波长漂移,波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与该应变值 ϵ_T 的关系表示为

$$\Delta\lambda = \lambda \left(1 - \frac{p_e^1 n_{\text{eff}}^1 - p_e^2 n_{\text{eff}}^2}{\Delta n_{\text{eff}}} \right) \epsilon_T, \quad (2)$$

式中: n_{eff}^1 为微纳光纤基模有效折射率差; n_{eff}^2 为高阶模的有效折射率差; Δn_{eff} 为基模和高阶模的有效折射率差; p_e^1 为基模的有效光弹系数; p_e^2 为高阶模的有效光弹系数; λ 为锥形微纳光纤的中心波长值。

结合(1)、(2)式,可以得到干涉谱波长差 $\Delta\lambda$ 与外加磁场的关系为

$$\Delta\lambda = \left(1 - \frac{p_e^1 n_{\text{eff}}^1 - p_e^2 n_{\text{eff}}^2}{\Delta n_{\text{eff}}} \right) C_i \lambda H^2 \approx (1 - P_e) C_i \lambda H^2, \quad (3)$$

式中: P_e 为微纳光纤的有效光弹系数。所以,传感器的磁场灵敏度可以表示为

$$S_H = \frac{d\Delta\lambda}{dH} \approx 2(1 - P_e) C_i \lambda H. \quad (4)$$

3 实验与结果

微纳光纤干涉仪的制备方法如图 2(a)所示。先将单模光纤固定在两个微位移平台上,再将固定在二维微位移平台上的氢氧焰移动过来,加热 1 s 后,固定光纤的微位移平台相向运动一定距离,完成拉锥,火焰撤离。火焰的大小可以通过调节气体流量计的流量来

实现,拉锥的微纳光纤的直径和长度,可通过在拉锥程序上设置拉锥速度和拉锥长度来实现,自动化进一步拉锥,制作简单,重复性高。所拉制的微纳光纤如图 2(b)所示,微纳光纤的长度约为 9 mm,图 2(c)为微纳光纤干涉仪的敏感区的扫描电镜(SEM)图片,敏感区微纳光纤直径约为 $6.7 \mu\text{m}$ 。

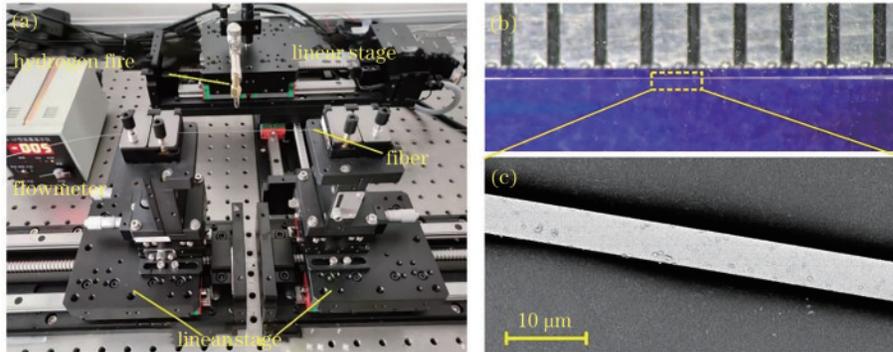


图 2 微纳光纤干涉仪。(a)实验装置;(b)显微图片;(c)敏感区扫描电镜图片

Fig. 2 Microfiber interferometer. (a) Experimental setup; (b) micrograph; (c) SEM image of sensitive area

将熔融拉锥制得的双锥型微纳光纤干涉仪两端固定在微位移平台上,在基准长度为 73.5 mm 情况下,沿轴向拉伸微纳光纤干涉仪,每次拉伸 $20 \mu\text{m}$,结果如图 2 所示,干涉谱型随着轴向拉伸长度增大,波长向长波长方向漂移,反之,随着轴向的拉伸减小,波长向短

波长方向漂移,如图 3(a)所示,其应力灵敏度约为 $0.016 \text{ nm}/\mu\epsilon$,如图 3(b)所示。将该微纳光纤干涉仪与 TbDyFe 磁致伸缩棒平行固定封装后,在自然状态和室温环境下,其波长抖动的均方差约为 0.015 nm ,如图 3(c)所示,具有较好的稳定性。

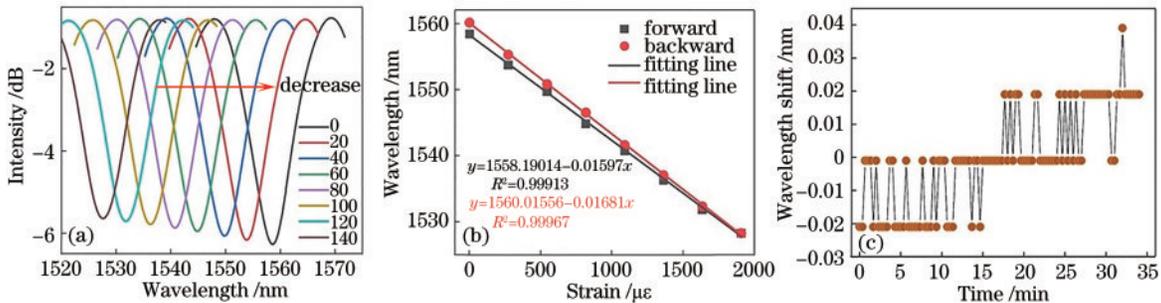


图 3 实验结果。(a)干涉谱型随拉伸长度的变化关系;(b)微纳光纤干涉仪的应变特性;(c)微纳光纤磁场传感器的稳定性

Fig. 3 Experimental results. (a) Variation of interference spectrum with tensile length; (b) strain characteristics of microfiber interferometer; (c) stability of microfiber magnetic field sensor

将微纳光纤干涉仪分别与直径为 2 mm、3 mm 的 TbDyFe 磁致伸缩棒平行接触并用低折射率紫外胶固定两端,让微纳光纤干涉仪的敏感区基本位于中间位置,封装后的实物图如图 1(b)所示。按照如图 1 所示的实验装置将光纤两端分别连接宽带光源和光谱仪,并将其置于磁场发生器的两个磁极面之间,将磁场感测探头放置光纤传感器附近,调节磁场发生器电流源的电流大小,测量不同磁场大小的波长响应。其中, TbDyFe 磁致伸缩棒的长度为 3.5 cm,磁场从 0 mT 增至 120 mT 左右。实验结果如图 4 所示,随磁场增大,透射谱蓝移,反之,随着磁场减小,透射谱红移。直径为 3 mm 的 TbDyFe 磁致伸缩棒对应的光纤磁场传感

器对磁场的响应结果如图 4(a)和(b)所示,在 0~40 mT 范围具有很好的线性响应,灵敏度约为 $0.099 \text{ nm}/\text{mT}$,线性度约为 0.97,且磁场递增和递减的过程波长响应基本重合。直径为 2 mm 的 TbDyFe 磁致伸缩棒对应的光纤磁场传感器对磁场的响应结果如图 4(c)和(d)所示,在 0~40 mT 范围具有很好的线性响应,灵敏度约为 $0.17 \text{ nm}/\text{mT}$,线性度约为 0.94。

根据图 4(c)所示的微纳光纤干涉仪的波长抖动的均方差,可以计算出直径为 2 mm TbDyFe 磁致伸缩棒对应的光纤磁场传感器的磁场变化分辨率可以达到 0.25 mT 。

本文对比分析了近几年基于磁致伸缩棒与光纤器

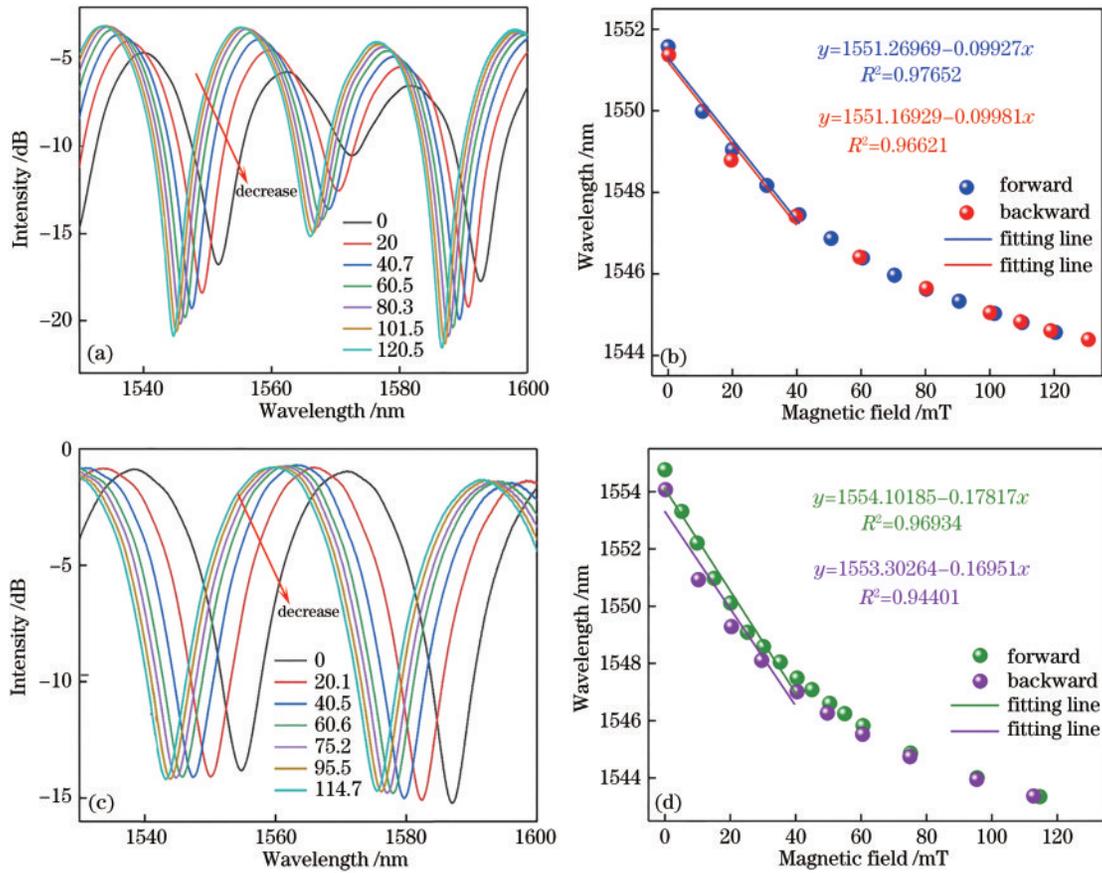


图4 实验结果。(a) 3 mm TbDyFe棒和(b) 2 mm TbDyFe棒的干涉谱型随磁场的变化关系；(c) 3 mm TbDyFe棒和(d) 2 mm TbDyFe棒的dip1波长随磁场的变化关系

Fig. 4 Experimental results. Variation of interference spectrum with magnetic field of (a) 3 mm TbDyFe rod and (b) 2 mm TbDyFe rod; variation of wavelength of dip1 with magnetic field of (c) 3 mm TbDyFe rod and (d) 2 mm TbDyFe rod

件结合测量磁场的文献,对比结果如表1所示,在磁场测量灵敏度上,本文所提传感器远高于光纤布拉格光栅光栅磁场传感器,测量区间上大于光纤FP腔磁场传感器。

表1 基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器

Table 1 Magnetic field optical fiber sensor based on magnetostrictive material

Scheme	Image	Detection range /mT	Sensitivity /($\text{nm} \cdot \text{mT}^{-1}$)	Reference
Etched side circle of FBG		0-50	1.08×10^{-3}	[16]
EFFPI		0-23.2	8.5473	[17]
FBG-FP cavity		-0.1-0.1	5×10^{-4}	[19]
FBG		0-90	1.2×10^{-3}	[20]
FBG		50-65	2×10^{-3}	[21]
Microfiber interferometer		0-40	0.178	Proposed

4 结论

本文提出一种微纳光纤磁场传感器,将单模光纤经过熔融拉锥形成微纳光纤干涉仪,并与 TbDyFe 超磁致伸缩棒平行固定封装形成光纤磁场传感器。直径为 $6.7\ \mu\text{m}$ 的微纳光纤干涉仪和直径为 $2\ \text{mm}$ 的 TbDyFe 磁致伸缩棒组成的光纤磁场传感器灵敏度可以达到 $0.178\ \text{nm/mT}$ 。通过优化微纳光纤干涉仪的直径和 TbDyFe 磁致伸缩棒的直径,可以进一步优化磁场传感器的测量特性,实现大测量区间、高灵敏、高分辨率的磁场探测。该传感器制备方法简单、工艺成熟、结构简单、易于实用化,有望进一步推动光纤传感器在实际生产生活中的应用。

参 考 文 献

- [1] Poliakov S V, Reznikov B I, Shchennikov A V, et al. The range of induction-coil magnetic field sensors for geophysical explorations[J]. *Seismic Instruments*, 2017, 53(1): 1-18.
- [2] Zheng C, Zhu K, Cardoso de Freitas S, et al. Magneto-resistive sensor development roadmap (non-recording applications)[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, 55(4): 0800130.
- [3] Trigona C, Sinatra V, Andò B, et al. Flexible microwire residence times difference fluxgate magnetometer[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(3): 559-568.
- [4] Tan C, Wang J C, Li Z L. A frequency measurement method based on optimal multi-average for increasing proton magnetometer measurement precision[J]. *Measurement*, 2019, 135: 418-423.
- [5] Liu Y G, Yang D Q, Wang Y X, et al. Fabrication of dual-parameter fiber-optic sensor by cascading FBG with FPI for simultaneous measurement of temperature and gas pressure[J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 166-171.
- [6] 刘思晨, 黄恽, 邓传鲁, 等. 基于磁致折变效应的掺钕光纤磁场传感器温度特性研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(9): 0910002.
Liu S C, Huang Y, Deng C L, et al. Temperature characteristics of Er-doped fiber magnetic field sensor based on magneto-refractive effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(9): 0910002.
- [7] 孙立朋, 黄赟赟, 关柏鸥. 微光纤干涉型生物传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306004.
Sun L P, Huang Y Y, Guan B O. Microfiber interferometric biosensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306004.
- [8] Okamura H. Fiber-optic magnetic sensor utilizing the Lorentzian force[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(10): 1558-1564.
- [9] Sun L, Jiang S, Marcianite 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.
- [10] Ma Z L, Miao Y P, Li Y, et al. A highly sensitive magnetic field sensor based on a tapered microfiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 6803308.
- [11] 李永倩, 温芳芳, 王劭龙. 基于磁流体的温度磁场测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0500003.
Li Y Q, Wen F F, Wang S L. Research progress of temperature and magnetic field dual-parameter measurement technology based on magnetic fluids[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0500003.
- [12] He W, Cheng L H, Yuan Q, et al. Magnetostrictive composite material-based polarimetric heterodyning fiber-grating laser miniature magnetic field sensor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(5): 050602.
- [13] Chen F F, Jiang Y. Fiber optic magnetic field sensor based on the TbDyFe rod[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(8): 085106.
- [14] Shao Z H, Qiao X G, Rong Q Z, et al. Fiber-optic magnetic field sensor using a phase-shifted fiber Bragg grating assisted by a TbDyFe bar[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 261: 49-55.
- [15] Yariv A, Winsor H V. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(3): 87-89.
- [16] 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.
- [17] Zhang P, Tang M, Gao F, et al. An ultra-sensitive magnetic field sensor based on extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer and Terfenol-D[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3332-3337.
- [18] 马瑞, 张文涛, 李芳. 基于超磁致伸缩材料的光纤磁场传感器[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2019, 40(6): 6-10.
Ma R, Zhang W T, Li F. A fiber optic magnetic sensor utilizing giant magnetostrictive materials and fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2019, 40(6): 6-10.
- [19] Ma R, Zhang W T, Wang Z G, et al. Fiber Bragg grating sensor for magnetic field measurement[C]//2017 IEEE SENSORS, October 29-November 1, 2017, Glasgow, UK. New York: IEEE Press, 2017.
- [20] Kaplan N, Jasenek J, Červeňová J. The influence of magnetic field applied on fiber Bragg gratings[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1996: 020024.
- [21] Ribeiro A, Frazão O, Jorge P. Magnetic field sensor with Terfenol-D thin-film coated FBG[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 84213C.