

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209162

具有温度补偿的拱形增敏微纳光纤磁场传感器*

王希鑫¹, 赵 勇^{1,2}, 吕日清¹, 郑洪坤¹, 周怡凡¹

(1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110000; 2. 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要:提出了一种基于铽镝铁(TbDyFe)的具有温度补偿的拱形增敏微纳光纤磁场传感器。传感器由光纤布拉格光栅(FBG), 拱形微纳光纤和 TbDyFe 组成, 拱形微纳光纤通过紫外胶(UV glue)粘接在 TbDyFe 上。与非拱形微纳光纤相比, 拱形光纤可将 TbDyFe 的伸长转化为光纤曲率半径的变化, 引起干涉波长偏移, 从而实现磁场灵敏度的提高。随着磁场强度升高, 拱形微纳光纤的干涉波长蓝移, 灵敏度为 47.81 pm/mT, FBG 对磁场不敏感, 拱形微纳光纤传感器的磁场灵敏度比非拱形高 11.66 倍。升温过程中拱形微纳光纤的干涉波长发生蓝移, 温度灵敏度为 43.02 pm/°C, FBG 的干涉波长发生红移, 温度灵敏度为 9.34 pm/°C。磁场传感器显示出良好的重复性和线性, 级联的 FBG 对磁场不敏感, 可以实现对磁场传感器的温度补偿。

关键词: 拱形; 微纳光纤; 磁场; 温度补偿; 铽镝铁。

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Arched sensitized microfiber magnetic field sensor with temperature compensation

Wang Xixin¹, Zhao Yong^{1,2}, Lyu Riqing¹, Zheng Hongkun¹, Zhou Yifan¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110000, China;

2. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: An arched sensitized microfiber magnetic field sensor with temperature compensation based on TbDyFe is proposed. The magnetic field sensor is consisted of FBG, an arched microfiber, and a TbDyFe. Microfiber is bonded to the TbDyFe by UV glue. Compared with the non-arched microfiber, the arched microfiber can convert the elongation of TbDyFe into the change of curvature radius of microfiber, resulting in the shift of interference wavelength, thereby realizing the improvement of the sensitivity. The interference wavelength of microfiber shows a blue shift with the increase of magnetic field intensity. The magnetic field sensitivity is 47.81 pm/mT and FBG is not sensitive to the magnetic field. The magnetic field sensitivity of arched microfiber is 11.66 times higher than that of the non-arched microfiber. During the heating process, the interference wavelength of arched microfiber is blue-shifted and the temperature sensitivity is 43.02 pm/°C. The interference wavelength of FBG is red shifted and the temperature sensitivity is 9.34 pm/°C. The magnetic field sensor shows good repeatability and linearity with the increase of the magnetic field. The cascaded FBG is not sensitive to the magnetic field and can realize temperature compensation for the sensor.

Keywords: arch; microfiber; magnetic field; temperature compensation; TbDyFe

0 引 言

磁场传感器已广泛应用于电力系统、环境监测、航空航天等不同的工业领域^[1]。近年来, 光纤磁场传感器以其结构紧凑、耐腐蚀、传感距离长等优点成为传感技术研

究领域的热点之一。

磁致伸缩材料已成为应用于光纤磁场传感器的主流磁敏材料之一。基于磁致伸缩的原理, 研究人员提出了各种与磁致伸缩材料相结合的光纤磁场传感器进行磁场测量。2013年, Dai等^[2]提出了一种磁致伸缩薄膜涂覆的带有螺旋微槽的FBG磁场传感器, 其中飞秒激光可将

收稿日期: 2022-01-09 Received Date: 2022-01-09

* 基金项目: 国家自然科学基金(61933004)、河北省自然科学基金(F2020501040)项目资助

FBG 加工成螺旋槽槽结构。通过在光纤光栅包层中涂覆磁致伸缩薄膜,可以提高光纤光栅磁场传感器的灵敏度。在 0~100 mT 的磁场范围内,磁场灵敏度为 0.7 $\mu\text{m}/\text{mT}$ 。上述磁场传感器利用磁致伸缩材料使光纤伸长,由于光纤包层的杨氏模量较高,传感器的磁场灵敏度较低。为了提高磁场传感器的灵敏度,研究人员将杨氏模量比光纤小的聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)用于传感器的制作。2017 年,Zhou 等^[3]提出了一种基于法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)的磁场传感器,磁场传感器是由 2 个 FBG 和 1 个法布里-珀罗 PDMS 腔组成,FPI 通过 UV 胶粘合在磁致伸缩材料上。在 0~70 mT 的磁场范围内磁场灵敏度为 34.83 $\mu\text{m}/\text{mT}$,传感器的温度灵敏度为 255.75 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。2018 年,Chen 等^[4]提出了一种利用 PDMS 软熔接的单模光纤-空芯光纤-单模光纤的 FPI 磁场传感器,传感器的结构固定在磁致伸缩棒上,通过磁场作用下磁致伸缩材料的伸长来引起 FPI 腔长的改变。传感器的磁场灵敏度为 75 $\mu\text{m}/\text{mT}$,温度灵敏度为 2 854 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。虽然利用 PDMS 可以提高基于磁致伸缩材料的光纤磁场传感器的灵敏度,但是 PDMS 所引起的温度灵敏度过高,使得磁场传感器易受温度的影响。

在本文中,提出了一种基于 TbDyFe 的拱形微纳光纤磁场传感器,该传感器结构简单,通过将微纳光纤制成拱形可以提高传感器的磁场灵敏度,同时 FBG 可以对传感器进行温度补偿。结果表明该磁场传感器的磁场灵敏度为 47.81 $\mu\text{m}/\text{mT}$,FBG 的温度补偿的灵敏度为 9.34 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。

1 传感原理以及传感器的制作

1.1 传感原理

磁场传感器示意图如图 1 所示。该传感器由 1 片 TbDyFe 拱形微纳光纤和 1 个 FBG 组成,拱形微纳光纤通过 UV 胶粘接在磁致伸缩材料上,拱形微纳光纤是由 2 个过渡区以及 1 个锥区组成。

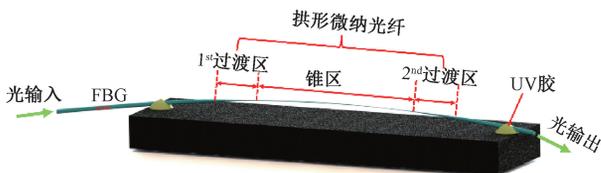


图 1 磁场传感器示意图

Fig. 1 Structure diagram of the magnetic field sensor

当光经过传感器的 FBG 时,透射光谱在布拉格波长处呈现窄带吸收峰,布拉格波长^[5]可以表示为:

$$\lambda_{\text{FBG}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: n_{eff} 是 FBG 的有效折射率, Λ 是 FBG 的调制周期。当温度变化时,FBG 的布拉格波长会发生偏移,其温度灵敏度可以表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}}}{\lambda_{\text{FBG}}} = (\alpha_T + \zeta_T)T \quad (2)$$

式中: λ_{FBG} 为 FBG 的干涉波长, ζ_T 为光纤的热光系数, α_T 为光纤的热膨胀系数。

当光通过图 1 微纳光纤的 1st 过渡区时,由于光纤直径的突然下降,可以轻松激发出高阶包层模式。因此,输入光将分为两个通道:一个通道在纤芯中传输,另一个在包层中传输。当光到达 2nd 过渡区时,高阶包层模式将再次耦合回纤芯。拱形微纳光纤的输出光谱可视为纤芯模式以及包层模式的干涉,可以表示为^[6]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\Delta n_{\text{eff}}L/\lambda) \quad (3)$$

式中: I 为输出光谱的强度; I_1 和 I_2 分别为纤芯模式和包层模式的光强; Δn_{eff} 是纤芯模式和包层模式的有效折射率差; L 是纤芯模式和包层模式的耦合长度, λ 是工作波长。

当纤芯模式和包层模式的相位差为 $(2m + 1)\pi$ ^[7] 时,输出光谱的光强达到最小值,即:

$$2\pi\Delta n_{\text{eff}}L/\lambda_m = (2m + 1)\pi \quad (4)$$

式中: m 是整数, λ_m 是 m 阶的干涉波长。

因此,干涉波长 λ_m 可表示为:

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

如图 2(a) 所示,当向 TbDyFe 施加轴向磁场时,磁致伸缩材料的伸长将改变拱形微纳光纤的曲率半径。图 2(b) 为传感器的应力模拟结果,从图 2(b) 可以看出,拱形为微纳光纤在腰部区域施加了应力,即在纤芯模式和包层模式的位置施加应力,这为磁场作用下磁致伸缩材料的伸长转化为拱形微纳光纤曲率半径的变化提供了条件。

拱形微纳光纤的纤芯模式和包层模式间的应变差 $\Delta\varepsilon_1$ 由文献[8] 给出:

$$\Delta\varepsilon_1 = d/R \quad (6)$$

式中: d 是纤芯模式和包层模式间的距离。拱形微纳光纤的曲率半径 R 可以表示为^[9]:

$$\frac{1}{R} = \sqrt{24x/s^3} \quad (7)$$

式中: s 是 TbDyFe 上微纳光纤的长度。为了使得微纳光纤弯曲成拱形,微纳光纤将沿材料长度的方向位移 x ,如图 2(a) 所示,红色以及绿色条状分别表示非拱形光纤和拱形光纤。

根据式(6)和(7),纤芯模式和包层模式间的应变差 $\Delta\varepsilon_1$ 如式(8) 所示。

$$\Delta\varepsilon_1 = d/R = d\sqrt{24x/s^3} \quad (8)$$

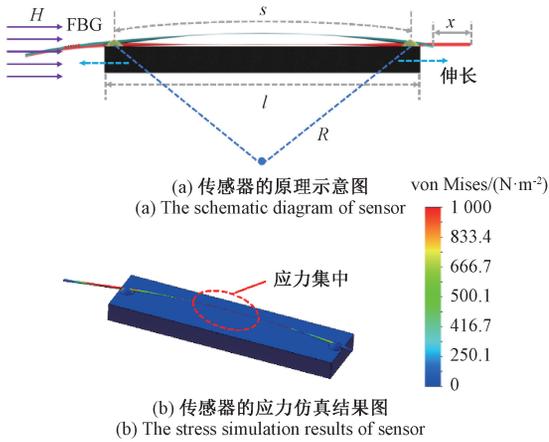


图 2 磁场传感器的原理示意图以及应力仿真图
Fig. 2 Schematic diagram and stress simulation results of sensor

纤芯模式和包层模式的有效折射率差 Δn_{eff} 可以表示为:

$$\Delta n_{\text{eff}} = \Delta n_{\text{eff}0} + K\Delta\varepsilon_1 \quad (9)$$

式中: $\Delta n_{\text{eff}0}$ 是纤芯模式和包层模式的初始有效折射率差, K 是应变折射率系数。

根据式(3)、(8)和(9),干涉波长 λ_m 可表示为:

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}0}L}{2m+1} + \frac{2KdL}{2m+1} \sqrt{24x/s^3} \quad (10)$$

当磁场作用于 TbDyFe 时,磁致伸缩材料的伸长会影响位移 x , 从而改变传感器的干涉波长。因此,干涉波长随外界磁场的偏移可以表示为:

$$\Delta\lambda_m = \frac{2KdL}{(2m+1)} (\sqrt{24(x - \Delta\varepsilon_2 l)/s^3} - \sqrt{24x/s^3}) \quad (11)$$

式中: $\Delta\varepsilon_2$ 是磁场作用下 TbDyFe 中的应变变化, l 是 TbDyFe 的长度。

从式(11)可以看出,随着磁场的增加,拱形微纳光纤的波长 λ_m 将向短波长方向移动。

为了突出拱形微纳光纤的优点,通过对非拱形(直)微纳光纤和拱形微纳光纤施加从 0~200 $\mu\varepsilon$ 的应变变化,观察非拱形微纳光纤和拱形微纳光纤两者干涉波长的偏移。图 3 为两种光纤的模拟结果,拱形微纳光纤的应变灵敏度为 2.81 $\text{pm}/\mu\varepsilon$,而非拱形微纳光纤的应变灵敏度 0.46 $\text{pm}/\mu\varepsilon$ 。因此,拱形微纳光纤的应变灵敏度大于非拱形微纳光纤的应变灵敏度。

拱形高度是影响拱形结构的主要参数,考虑到实验室磁场发生装置的限制,首先对不同拱形高度的微纳光纤以 4 mT 每步施加 0~32 mT 的磁场强度,观察不同拱形高度的微纳光纤的波长偏移情况,图 4(a) 分别为拱形高度 100、150、200、250 以及 300 μm 的模拟结

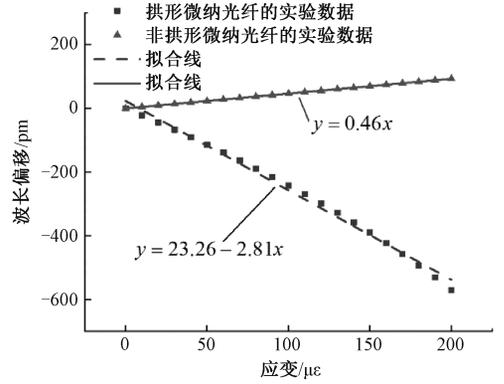
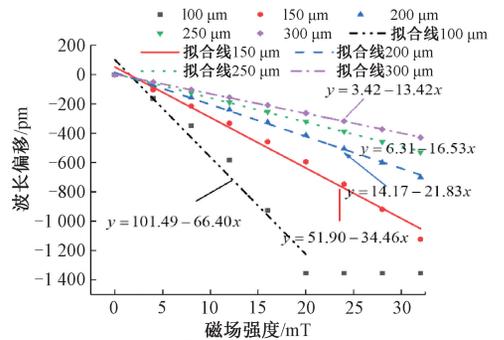
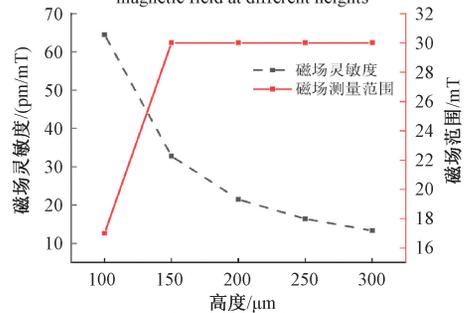


图 3 拱形和非拱形微纳光纤的干涉波长偏移与应变的关系

Fig. 3 Wavelength shift with the change of strain of arched and non-arched microfiber



(a) 不同高度下, 波长偏移与磁场的关系
(a) The relationship between wavelength shift and magnetic field at different heights



(b) 高度对磁场灵敏度和范围的影响
(b) The influence of height on the magnetic field sensitivity and range

图 4 不同拱形高度传感器的光谱仿真结果
Fig. 4 Spectral simulation results of different arch heights of sensor

果,其灵敏度分别为 66.40、34.46、21.83、16.53 以及 13.42 pm/mT 。图 4(b) 为拱形高度对测量范围以及灵敏度的影响,可以看出,拱形高度越低,传感器的磁场灵敏度越高。然而,拱形高度为 100 μm ,磁场强度大于 20 mT 时,波长不再随着磁场强度的变化而变化,因此拱形的变化达到饱和,拱形增敏的作用消失。综合

考虑测量范围以及灵敏度,选择拱形高度为 $150\ \mu\text{m}$ 的传感器进行制作。

1.2 传感器制作

在磁场传感器的制作过程中,采用了文献[10]报道的两步拉锥法来制作微纳光纤。将 Corning 公司 SMF-28 的单模光纤与 FBG 用熔接机(FITEL s179)熔接,为了防止磁致伸缩材料的应力对 FBG 产生的影响,在离 FBG 栅区 $30\ \text{mm}$ 处将单模光纤的涂覆层剥离。然后,将单模光纤的剥离区域放置在熔接机中进行第 1 次拉锥,电弧放电的强度为 $150\ \text{bit}$,电弧放电的时间为 $300\ \text{ms}$ 。上述预制的微纳光纤再次放入光纤拉锥机中(Ideal-photonics, IPCS-5000SMT)进行第 2 次拉锥。第 2 次拉锥的具体参数为:第 1 步以 $0.09\ \text{mm/s}$ 的拉制速度和 $150\ \text{sccm}$ 的氢气流速拉至 $2\ \text{mm}$;第 2 步以 $0.12\ \text{mm/s}$ 的拉制速度和 $100\ \text{sccm}$ 的氢气流速拉至 $6\ \text{mm}$;最后一步以 $3\ \text{mm/s}$ 的拉制速度和 $120\ \text{sccm}$ 的氢气流速拉至 $12\ \text{mm}$ 。其次,如图 5(a)所示,制作的微纳光纤的 1 端首先用 UV 胶粘接到 TbDyFe 上,然后,如图 5(b)所示,为了在 TbDyFe 上形成拱形微纳光纤,将光纤的 2 端通过微位移平台沿着 TbDyFe 的长度方向移动距离 x 。最后,如图 5(c)所示,利用 UV 胶将拱形微纳光纤的 2 端粘接到 TbDyFe 上。图 5(d)为传感器的示意图,拱形微纳光纤腰区的显微放大图如图 5(e)所示,其中腰区的最高点与 TbDyFe 间的距离为 $153\ \mu\text{m}$,腰部长度为 $6.9\ \text{mm}$,腰围直径为 $12\ \mu\text{m}$,TbDyFe 的轴向方向为磁致伸缩方向。

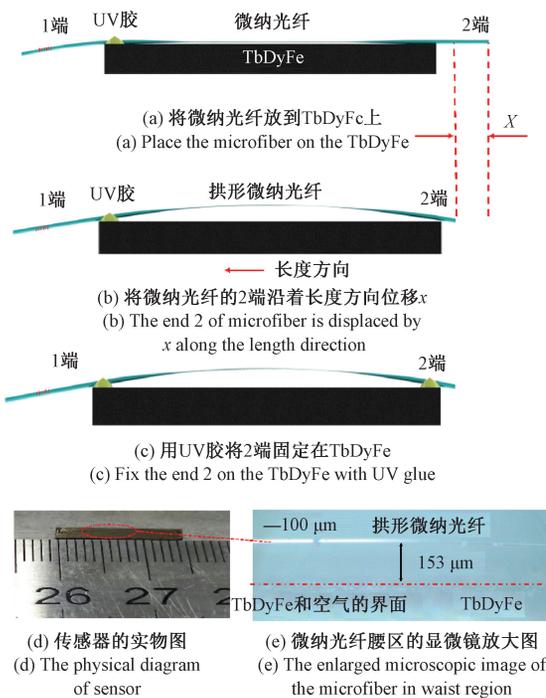


图 5 传感器的制作过程以及实物图

Fig. 5 Manufacturing process and physical diagram of sensor

2 实验结果及讨论

图 6 为磁场传感系统的示意图。从放大自发辐射光源发射的光入射到磁场传感器中,形成 FBG 的窄带吸收峰和非拱形微纳光纤的模式干涉。随后发射的光将由光谱分析仪监测,采用与可编程直流电源相连的水冷线圈提供与传感器轴向方向平行的磁场,传感器的周围放置高斯计来检测磁场。

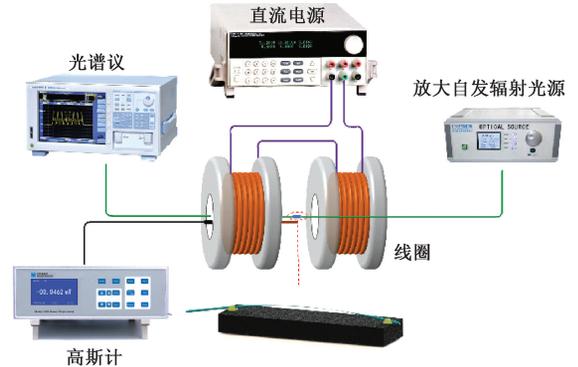


图 6 磁场传感系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the magnetic field sensing system

图 7(a)所示为传感器的透射光谱,是由拱形微纳光纤的光谱和 FBG 的光谱叠加而成,其中 FBG 的吸收峰为 $1554.89\ \text{nm}$ 。此外,由于纤芯模式和包层模式的干涉,光谱呈现出理想的余弦函数。图 7(b)所示为透射光谱的快速傅里叶变换,其中在图 7(b)存在一个 0.0222 的高振幅频率和几个弱振幅频率,这表明传感器的透射光谱由纤芯模式和一个主要的包层模式的干涉而成。

首先,在 $0\sim 38.57\ \text{mT}$ 下对传感器进行磁场响应实验。图 8 所示为不同磁场下的透射光谱,干涉波长 1 是 FBG 波长,而波长 2 为拱形微纳光纤中追踪的波长,插图分别是干涉波长 1 和干涉波长 2 的放大图。从图中可以看出波长 1 随着磁场的增加保持不变,而波长 2 随着磁场的增加向短波长移动。这是因为随着外界磁场的增加,TbDyFe 磁致伸缩材料会伸长,导致拱形微纳光纤的曲率半径随着磁场的增加而增大,从而导致纤芯模式和包层模式间的应变差减小,根据式(9),纤芯模式和包层模式的有效折射率差将减小,因此,干涉波长 2 将向短波长方向偏移。随着磁场增加,透射光谱强度增大,这是由于磁场增加引起拱形微纳光纤的曲率半径增大,从而使光的损耗减小。

磁场实验的波长偏移与磁场的关系如图 9(a)所示。对于干涉波长 1,磁场灵敏度为 0。对于干涉波长 2,波长偏移和磁场之间的关系可以分为两个区域。

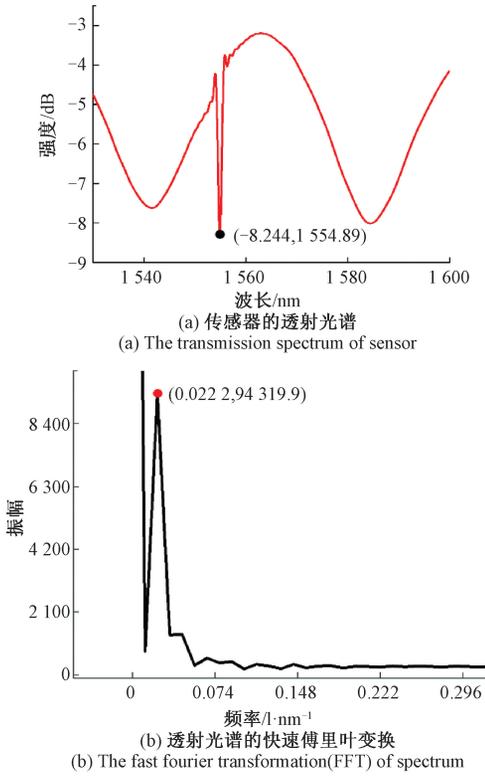


图 7 传感器的透射光谱及其傅里叶变换

Fig. 7 Transmission spectrum of sensor and the FFT

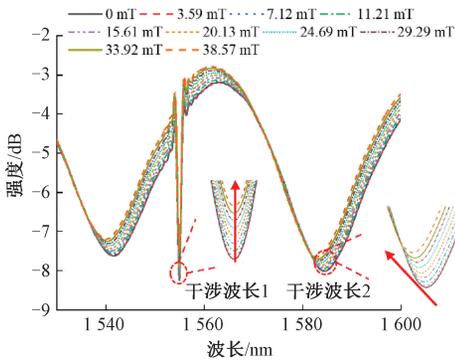


图 8 不同磁场下传感器的透射光谱的变化情况

Fig. 8 Transmission spectrum under different magnetic field

在区域 I,当磁场从 0 增加到 7.12 mT 时,干涉波长以非线性的方式缓慢地减小。在区域 II,干涉波长随着磁场的增加呈线性增加,磁场传感器的灵敏度为 47.81 pm/mT。磁场传感器在 0~38.57 mT 之间进行 3 次重复性实验,在 3 次实验中,以 0 mT 处的干涉波长 1 和干涉波长 2 为追踪的波长,磁场实验的结果如图 9(b) 所示,干涉波长 2 在 3 次重复性实验中存在着微小差异,这可能是由于传感器本身存在的误差引起的。重复性实验的最大标准偏差为 0.026 nm,说明磁场传感器具有良好的重复性。

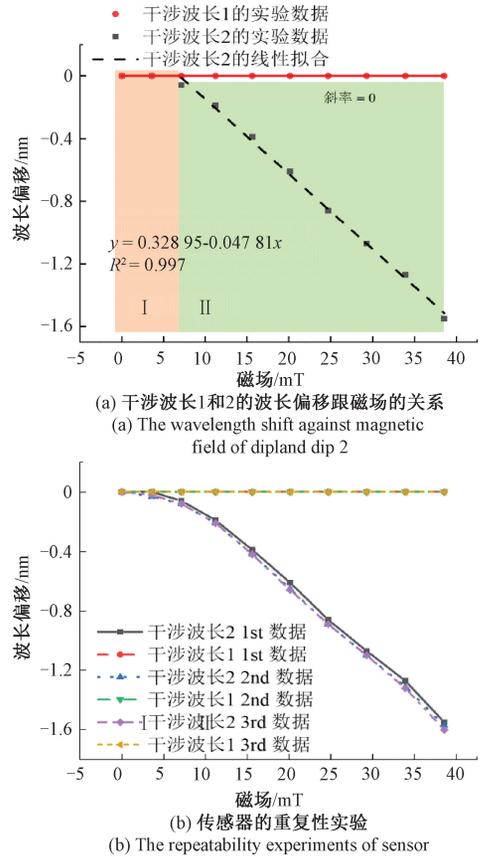


图 9 干涉波长随着磁场的变化以及传感器的重复性实验

Fig. 9 Wavelength shift against magnetic field and the repeatability experiments of sensor

光谱仪的型号为 AQ6370D,其波长的精度及分辨率分别为 10 pm 以及 20 pm,磁场传感器的灵敏度为 47.81 pm/mT,得出传感器干涉波长 2 的磁场分辨率为 0.42 mT。传感器的精度用 3 倍标准差值与满量程范围的比值表示,如式 (12) 所示,传感器的重复性实验的最大标准偏差为 0.026 nm,因此波长 2 的磁场检测精度为 4.8%。

$$E = \frac{3\sigma}{Y_{FS}} \tag{12}$$

式中: E 为检测精度, σ 为标准差, Y_{FS} 为满量程输出。

为了突出所提出拱形微纳光纤的增敏作用,将一个非拱形的微纳光纤粘接在磁致伸缩材料(1 mm×3 mm×12 mm)上,非拱形微纳光纤的干涉波长偏移随着磁场强度的增大如图 10 所示,其中的插图为其透射光谱与磁场的关系,非拱形微纳光纤在 0~37.45 mT 的磁场范围内的磁场灵敏度为 4.10 pm/mT。因此,拱形微纳光纤的磁场灵敏度比非拱形的高 11.66 倍,高于理论分析的倍数,一方面是由于拱形微纳光纤所使用的磁致伸缩材料的长度小于非拱形微纳光纤,另一方面可能是由于实验误差所引起的。

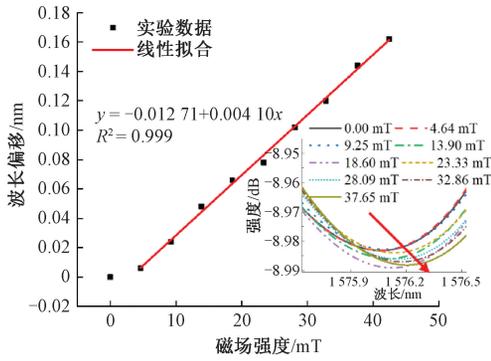


图10 不同磁场下非拱形微纳光纤波长偏移与透射光谱的变化

Fig. 10 Variation of wavelength shift and transmission spectrum of non-arched microfiber under different magnetic field

磁场传感器的温度响应特性测量是通过将传感器置于 23.49℃~52.30℃ 的恒温箱内实现的。图 11 所示为传感器随温度升高的透射光谱,通过对透射光谱干涉波长的追踪来感知不同温度下干涉波长的变化。插图分别是干涉波长 1 和干涉波长 2 的局部放大图,干涉波长 1 随温度的增加向长波长方向移动,这是由光纤的热光系数和热膨胀系数引起的^[11]。干涉波长 2 随着温度的升高而出现蓝移,这是由于 UV 胶和磁致伸缩材料的膨胀导致拱形微纳光纤的曲率半径增加。

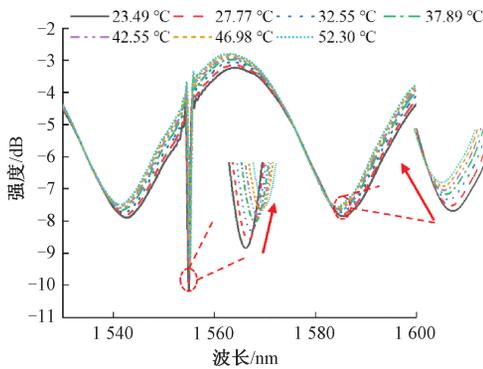


图11 传感器的温度实验

Fig. 11 Temperature experiments of sensor

图 12 所示为不同温度下干涉波长 1 和 2 的波长偏移。拟合结果表明,干涉波长 1 的温度灵敏度为 9.34 pm/℃,干涉波长 2 的温度灵敏度为 43.02 pm/℃。

考虑到磁场传感器的阈值,使用如下方程式进行 7.12~38.57 mT 的温度补偿。

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{dip1}} \\ \Delta\lambda_{\text{dip2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 9.34 \\ -47.81 & -43.02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (13)$$

首先,将干涉波长 1 的偏移代入式(13)中来获得温度的变化。然后,通过温度的变化和干涉波长 2 的偏移获得磁场大小,可以用式(14)表示。

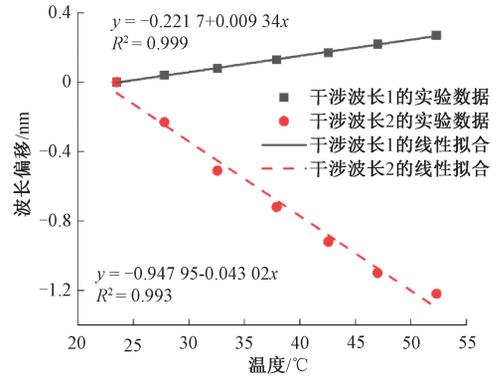


图12 传感器的干涉波长与温度的关系

Fig. 12 Relationship between the interference spectrum of sensor and temperature

$$\Delta H = -\frac{\Delta\lambda_{\text{dip2}}}{47.81} - \frac{43.02\Delta T}{47.81} \quad (14)$$

表 1 所示为基于磁致伸缩材料的不同磁场传感器的传感性能。可以看出,基于回音壁模式的磁场传感器的灵敏度^[12]和基于 FBG 粘接磁致伸缩材料的磁场传感器的灵敏度^[13-15]低于所提出的磁场传感器。虽然 FPI 磁场传感器具有较高的灵敏度,然而温度灵敏度高于磁场灵敏度,这将成为实际应用的限制因素^[3-4]。所提出的磁场传感器的阈值可以通过施加额外的磁场来消除,通过增加 TbDyFe 的长度和优化拱形微纳光纤的参数可以进一步提高磁场传感器的灵敏度。

表 1 所提出的磁场传感器与其他基于磁致伸缩材料的磁场传感器的传感性能对比

Table 1 The sensing performance comparison between the proposed sensor and other magnetic field sensors based on magneto-strictive materials

原理	范围/mT	灵敏度 /(pm/mT)	灵敏度 /(pm/℃)	时间 /年	参考文献
FPI	0~70	34.830	255.75	2017	文献[3]
FPI	0~40	75.010	2 854.00	2018	文献[4]
回音壁	0.14~21.8	0.081	-	2019	文献[12]
FBG	0~240	0.500	-	2015	文献[13]
FBG	0~250	16.000	23.80	2017	文献[14]
FBG	6~28	8.770	5.41	2021	文献[15]
模式干涉	0~38	47.810	43.02	-	本文

3 结 论

本文介绍了基于 TbDyFe 的拱形微纳光纤级联 FBG 的磁场传感结构,实现了对磁场和温度同时测量,对拱形

微纳光纤和非拱形微纳光纤进行了理论分析以及实验验证,得出了拱形微纳光纤具有增敏作用的结论。研究了传感器的温度和磁场传感特性,建立了磁场传感器的干涉波长与磁场以及温度的关系,通过双参数矩阵可以解耦出磁场和温度的变化。本文提出的具有温度补偿的磁场传感器结构简单、体积小、重量轻,是解决磁场测量过程中温度串扰的有效手段。

参考文献

- [1] 王莉,王博文,翁玲,等. 高灵敏度光纤磁场传感器的设计与模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1281-1286.
WANG L, WANG B W, WENG L, et al. Design and modeling of high-sensitivity fiber magnetic field sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1281-1286.
- [2] DAI Y, YANG M, 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.
- [3] ZHOU B, LU C, MAO B M, et al. Magnetic field sensor of enhanced sensitivity and temperature self-calibration based on silica fiber Fabry-Perot resonator with silicone cavity[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8108.
- [4] CHEN X, WU S, ZENG Y, et al. Elastic optical fiber fabry-perot interferometer for highly sensitive AC magnetic field measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(14): 5799-5804.
- [5] 张雯,刘小龙,何巍,等. LPFG和FBG级联结构双参数光纤传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 2047-2054.
ZHANG W, LIU X L, HE W, et al. Study on dual-parameter fiber sensor based on LPFG cascaded with FBG structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 2047-2054.
- [6] YANG W, PAN R, YU X, et al. A high sensitivity asymmetric double tapered fiber interference sensor[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 210: 164495.
- [7] XING Z, WANG Y, TANG L, et al. High sensitivity refractive index sensor based on micro-fiber with micro-arched transition[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50(JUL.): 13-18.
- [8] GONG H, XIAO Y, KAI N, et al. An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(1): 22-24.
- [9] WANG Y, RICHARDSON D, BRAMBILLA G, et al. Intensity measurement bend sensors based on periodically tapered soft glass fibers[J]. Optics Letters, 2011,

36(4): 558-560.

- [10] XIA F, ZHAO Y. RI sensing system with high sensitivity and large measurement range using a microfiber MZI and a photonic crystal fiber MZI[J]. Measurement, 2020, 156(24): 107603.
- [11] 张雯,孟凡勇,宋言明,等. 飞秒刻写光纤 F-P 腔级联 FBG 传感特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2193-2199.
ZHANG W, MENG F Y, SONG Y M, et al. Research on the cascaded fiber F-P cavity fabricated by femtosecond laser with FBG and its sensing characterization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2193-2199.
- [12] GUO Y, ZHANG Y D, SU H Y, et al. Magnetic-field tuning whispering gallery mode based on hollow microbubble resonator with Terfenol-D-fixed. [J]. Applied optics, 2019, 58(32): 8889-8893.
- [13] KARANJA J M, DAI Y, ZHOU X, et al. Femtosecond laser ablated fbg multitrenches for magnetic field sensor application[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(16): 1717-1720.
- [14] FILOGRANO M L, PISCO M, CATALANO A, et al. Triaxial fiber optic magnetic field sensor for magnetic resonance imaging[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 3924-3933.
- [15] ZHAN B, NING T, PEI L, et al. Terfenol-D based magnetic field sensor with temperature independence incorporating dual fiber bragg gratings structure[J]. IEEE Access, 2021, 9: 32713-32720.

作者简介



王希鑫,2018年于东北大学大学获得学士学位。主要研究方向为光纤磁场传感器。
E-mail: 1810312@stu.neu.edu.cn

Wang Xixin received his B.Sc. degree from Northeastern University in 2018. His main research interest is optical fiber magnetic field sensor.



赵勇(通信作者),1996年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2001年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为东北大学教授,主要研究方向为新型光纤传感器技术、光电检测技术。

E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn

Zhao Yong (Corresponding author) received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Harbin Institute of Technology in 1996 and 2001, respectively. He is currently a professor at Northeastern University. His current research interests include the development of fiber-optic sensors and device, fiber Bragg grating sensors, novel sensor materials and principles, and optical measurement technologies.