

基于偏芯光纤手性微锥结构的长周期光纤光栅传感特性

宋睿成 刘蒙云 白瑶 何学兰 王铁滨 邢健 李文超 崔双龙

Sensing characteristics of long-period fiber grating based on chiral micro-taper structure of eccentric fiber

SONG Ruicheng, LIU Mengyun, BAI Yao, HE Xuelan, WANG Tiebin, XING Jian, LI Wenchao, CUI Shuanglong

引用本文:

宋睿成, 刘蒙云, 白瑶, 等. 基于偏芯光纤手性微锥结构的长周期光纤光栅传感特性[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1135–1142. DOI: 10.5768/JAO202546.0508002

SONG Ruicheng, LIU Mengyun, BAI Yao, et al. Sensing characteristics of long-period fiber grating based on chiral micro-taper structure of eccentric fiber[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1135–1142. DOI: 10.5768/JAO202546.0508002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0508002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于长周期光纤光栅的FBG解调方法

FBG demodulation method based on long-period fiber gratings

应用光学. 2022, 43(1): 160–166 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108002>

基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129–1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>

基于光纤光栅传感器的体外血管模型应力测量

Circumferential stress measurement of blood vessels model in vitro based on fiber Bragg grating sensor

应用光学. 2022, 43(5): 1007–1014 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508003>

基于无芯-少模-无芯光纤结构的温度传感特性研究

Temperature sensing characteristics based on coreless- few mode-coreless optical fiber structure

应用光学. 2022, 43(1): 167–170 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108003>

基于PDMS的光纤端面微纳结构转移法

Micro-nano structure transfer method of optical fiber end face based on PDMS

应用光学. 2020, 41(3): 631–636 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308003>

光纤布拉格光栅柔性传感器研究进展

Research progress of flexible sensor of fiber Bragg grating

应用光学. 2021, 42(5): 932–940 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1135-08

引用格式: 宋睿成, 刘蒙云, 白瑶, 等. 基于偏芯光纤手性微锥结构的长周期光纤光栅传感特性 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1135-1142.

SONG Ruicheng, LIU Mengyun, BAI Yao, et al. Sensing characteristics of long-period fiber grating based on chiral micro-taper structure of eccentric fiber[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1135-1142.



在线阅读

基于偏芯光纤手性微锥结构的长周期光纤光栅传感特性

宋睿成¹, 刘蒙云¹, 白瑶², 何学兰¹, 王铁滨¹, 邢健¹, 李文超¹, 崔双龙¹

(1. 东北林业大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 本研究提出了一种基于手性微锥结构的长周期光纤光栅 (long-period fiber grating, LPFG)。该结构通过电弧放电技术在偏芯光纤上制备而成。手性微锥结构的引入显著提升了传感器的性能, 不仅大幅提高了其扭转灵敏度, 还使传感器具有辨别扭转方向的能力。为深入探究这种手性微锥结构长周期光纤光栅的传感特性, 采用了仿真与实验相结合的方法。研究结果表明, 本文提出的传感器具有方向辨别能力, 其灵敏度高达 $592.1 \text{ pm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。与没有引手性结构的长周期光纤光栅相比, 不仅具有方向辨别功能, 而且灵敏度提升了近 3 倍。此传感器具有尺寸小、制备简单、高灵敏度的特点, 在健康监测、精确测量等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 手性微锥结构; 长周期光纤光栅; 偏芯光纤; 电弧放电技术

中图分类号: O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0508002

Sensing characteristics of long-period fiber grating based on chiral micro-taper structure of eccentric fiber

SONG Ruicheng¹, LIU Mengyun¹, BAI Yao², HE Xuelan¹, WANG Tiebin¹, XING Jian¹, LI Wenchao¹, CUI Shuanglong¹

(1. School of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150006, China)

Abstract: A long-period fiber grating (LPFG) based on chiral micro-taper structure was proposed. The chiral micro-taper structure was fabricated on the eccentric optical fiber through arc discharge technology, and its introduction significantly enhanced the performance of the sensor, which not only greatly improved its torsional sensitivity, but also enabled the sensor to have the ability to identify the torsional direction. To deeply explore the sensing characteristics of this chiral micro-taper structure long-period fiber grating, a method combining simulation and experiments was adopted. The research results show that the proposed sensor has the ability of direction discrimination, and its sensitivity is as high as $592.1 \text{ pm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$. Compared with long-period fiber gratings without chiral structures, it not only has the function of direction discrimination, but also its sensitivity is increased by nearly three times. This sensor features small size, simple preparation and

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2024-11-16

基金项目: 国家自然科学基金 (62205087); 东北林业大学大学生创新创业训练计划 (202410225004)

第一作者: 宋睿成, E-mail: 18264308178@163.com

通信作者: 何学兰, E-mail: chongjing2046@126.com;

王铁滨, E-mail: wangtiebin@nefu.edu.cn

high sensitivity, and has broad application prospects in fields such as health monitoring and precise measurement.

Key words: chiral micro-taper structure; long-period fiber gratings; eccentric fiber; arc discharge technology

引言

随着科技的不断进步和工业的快速发展,扭转量的精确测量在多个领域中的重要性日益凸显,比如在材料中可以评估金属、塑料等材料的扭转性能,以便对材料进行选择和优化。在机械工程中应用于轴类零件、螺栓等机械零件的扭转强度检测。在汽车制造和航空航天领域,扭转测量用于测试关键零部件的扭转强度,确保车辆和飞行器的安全性能。为了实现扭转参数的测量,人们通常采用电阻式、电容式和电感式等传感器进行扭转量的测量。但是这些传感器因体积大、不易埋伏、受电磁干扰大等缺点使其应用受到了限制。光纤传感器凭借体积小、成本低、寿命长、焊接损耗少,可实现多参量测量,有较强的抗腐蚀能力和较强的抗电磁干扰能力,以及能够作为传输媒介等优势^[1-2],在传感领域中有非常广泛的发展空间^[3-4],普遍应用于安全监测、军事、工程建筑和航空航天等领域^[5]。偏芯光纤是纤芯偏离光纤中心轴线的一类特种光纤,具有非中心对称结构^[6]。由于其特殊的结构,相比于单模光纤的纤芯,它更加接近外界环境,对外部环境的变化更加敏感,所以偏芯光纤在温度传感、液体折射率测量、弯曲传感等方面有着很大的优势^[7-10]。采用光纤制备的长周期光纤光栅(long-period fiber grating, LPFG)结构传感器已被应用于许多不同领域,比如在温度、静水压力以及生物传感领域的应用^[11-12]。其原理是在光纤的纵向区域形成周期性折射率调制^[13],使光纤中的光从纤芯向包层耦合,因此可以实现很多参数测定,具备许多特殊的优势,比如在生化检测领域的应用^[14-16]。在偏芯光纤上写入长周期光纤光栅,并将长周期光纤光栅和偏芯光纤的优点结合起来,可制备出高性能的光纤器件。

本文基于偏芯光纤分别制备了扭转型长周期光纤光栅(chiral micro taper long-period fiber grating, CMT-LPFG)和非扭转型长周期光纤光栅(micro taper long-period fiber grating, MTLPG),利用仿真软件对两者进行仿真并分析其耦合特性,随后对这两个样品的传感特性进行了测试,基于测试数据系统全面地分析了基于偏芯光纤的 MTLPG 的扭转传感特性和温度传感特性。最后对两个

样品的扭转传感数据进行对比,本文提出的手性微锥结构的长周期光纤光栅与没有扭转的微锥结构的长周期光纤光栅相比,不仅具有扭转的方向辨别能力,而且灵敏度提高了近 3 倍。同时,对两个样品的温度特性也进行了研究,MTLPG 和 CMT-LPFG 的温度灵敏度分别为 0.05857 nm/℃ 和 0.07214 nm/℃。

1 偏心长周期光纤光栅的制备及基本原理

电弧放电示意图如图 1(a) 所示,电弧放电系统主要由三维位移台、固定光纤夹具、电流表,以及固定在三维位移台上的可以扭转的光纤夹具、控制电路、电压调节器组成。首先将偏芯光纤(折射率分布图如图 1(b) 所示)两端分别固定在三维位移台上的光纤夹具上,将去除涂覆层的部分对准夹具中心电极处(此处放电),三维位移台的量程为 50 mm,光纤固定后要保持拉直状态,不能使其有横向的剪切应力。光纤的一端连接宽带光源(BBS, 900 nm~1700 nm),另一端连接分辨率为 0.02 nm 的光学光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA-Q6370, Japan)。电源接通时,位移台上的电极会对光纤进行放电,可以通过改变电流值的大小来控制放电处的温度。通电后电极放电并且右侧三维位移台会同步向前按照预设位移移动,移动过程中,由于放电处高温加热会导致光纤软化,加上两边位移台的拉伸作用,因此会在光纤上形成微锥结构,得到微锥结构的 LPFG;如果在拉伸的时候,同时旋转夹具(本文旋转 0.1 圈),就会得到扭转微锥结构 LPFG。放电过程中位移台会按照预设的位移移动一段距离,停止放电后三维位移台会继续前进一段距离,这两段位移之和就是一个扫描周期。完成一个周期以后,重复上面的步骤,直到形成长周期光纤光栅。本次实验中使用 23.9 mA 的电弧电流,电弧持续时间为 4.36 s。电弧放电时位移台移动的位移为 350 μm,过程中光纤拉伸的位移为 100 μm,设置电弧不放电时电极位移为 200 μm,所以光栅一个周期的长度为 650 μm。制备的 LPFG 微结构图如图 1(c) 和 1(d) 所示,可以看出纤芯位置发生了扭转(如红色框标记所示)。对应的结构示意图如图 1(e) 和 1(f) 所示。从图 1(f) 中可以看

出, 偏心光纤中的纤芯呈现手性扭转形状。而且扭转手性微锥不再是轴对称的均匀结构, 如图 1(d)

中光纤腰椎两侧的最低点不在光纤同一条径向直线上。

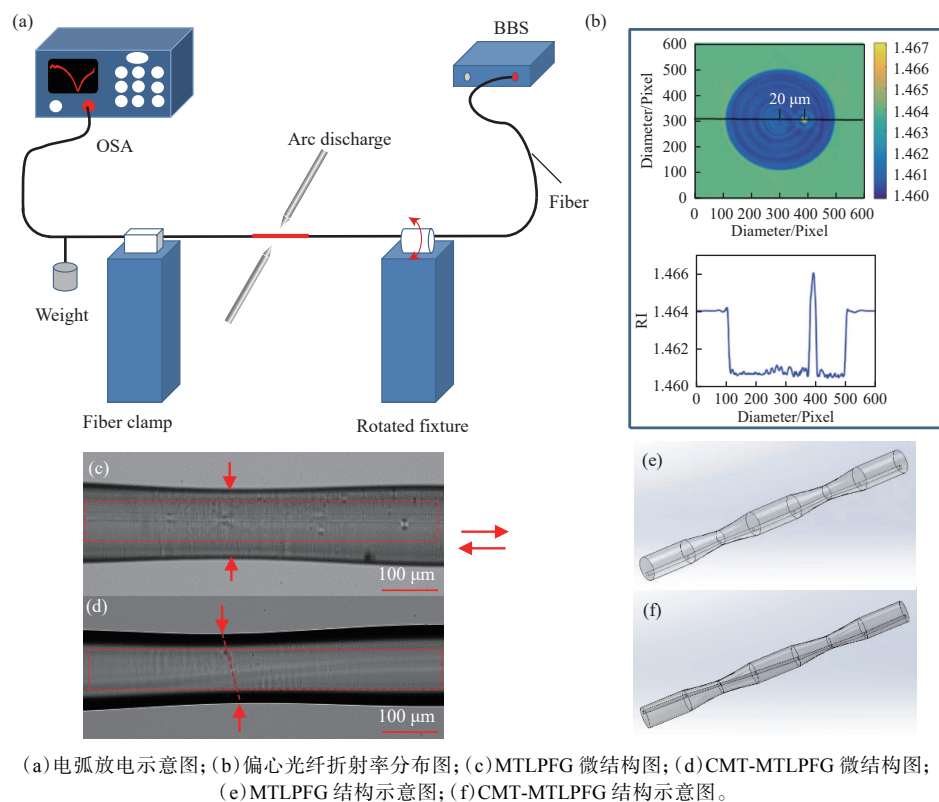


图 1 实验流程图

Fig. 1 Experimental flow chart

实验中制备的 MTLPG 和 CMT-LPFG 的透射谱如图 2 所示。当 MTLPG 周期数为 10 时, 在波长 1331.2 nm 处激发了最深共振峰, 强度大约为 18 dB; 当 CMT-LPFG 周期数为 5 时, 在波长 1461 nm 处激发了最深共振峰, 强度大约为 12 dB。从图 2 中可以看出, CMT-LPFG 衰减比 MT-LPFG 大一些, 这是因为在相同制备参数的情况下, 结构中引入扭转量加速了光从纤芯向包层的耦合。为了验证这一特点, 利用 RSOFT 软件中的 FD-BPM 模块对其进行建模仿真。为了与实验制备的传感样品参数一致, 设光栅的周期为 650 μm , 其中拉锥部分的长度设为 450 μm , 不放电的部分设为 200 μm , 周期数设置为 7 个。没有放电的单模光纤的纤芯和包层直径分别设为 8 μm 和 125 μm , 折射率分别设为 1.4682 和 1.4628。没有扭转的微锥包层直径设置为 110 μm , 有手性结构的微锥包层直径设为 112 μm , 为了简化模型, 默认锥区的折射率变化值是相同的。设锥区的纤芯和包层的折射率分别为 1.4661 和 1.4635, 得到的仿真结果如图 3

所示。从图 3 中可以看出, 相同周期内手性微锥结构的引入在很大程度上加快了能量从纤芯向包层的耦合, 这是由于偏芯光纤的纤芯靠近包层, 再加上扭转的外力, 使得纤芯中的能量加速了衰减, 这也使得传感器的尺寸大大减小, 仅为 3.25 mm。

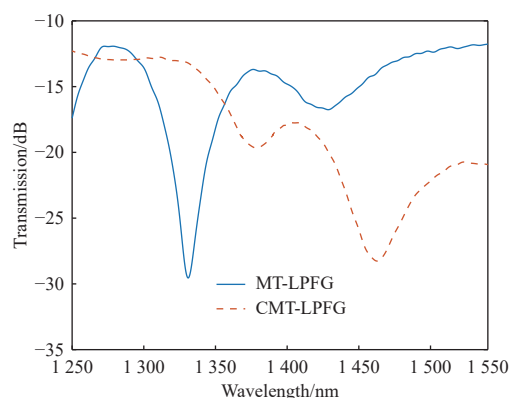


图 2 MTLPG 和 CMT-LPFG 透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of MTLPG and CMT-LPFG

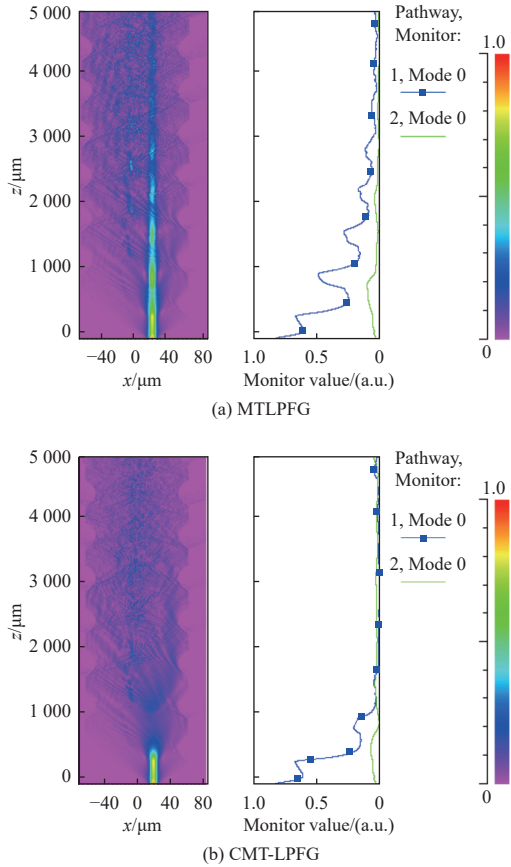


图3 能量在 MTL-PFG 和 CMT-LPFG 结构中传播的仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of energy propagation in MTL-PFG and CMT-LPFG structures

当光纤的折射率呈现周期性调制变化时,光能量会在基模与包层模之间发生耦合现象。此时,可运用模耦合理论来分析其测量原理^[17-20]。本文提出的微锥结构长周期光纤光栅主要利用了微锥折射率差异来激发包层模式,传输光谱中产生谐振峰的位置应满足相位匹配条件:

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{k,\text{cl}}^{\text{eff}})\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_{res} 为谐振峰所处的波长位置; $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 和 $n_{k,\text{cl}}^{\text{eff}}$ 分别表示纤芯模的有效折射率和第 k 阶包层模的有效折射率; Λ 为长周期光纤光栅的周期。给长周期光纤光栅上施加扭转应力 T_w 时,光栅谐振波长会发生移动,可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{res}} = \frac{\partial\Lambda(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{k,\text{cl}}^{\text{eff}})}{\partial T_w} + \frac{\partial(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{k,\text{cl}}^{\text{eff}})\Lambda}{\partial T_w} \quad (2)$$

当长周期光纤光栅受到扭转力作用时,会引起 Λ 、 $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 、 $n_{k,\text{cl}}^{\text{eff}}$ 差值的改变,因此会引起谐振波长位置的改变,通过记录光谱仪的数据就可以知道扭转率的改变。

2 分析与讨论

扭转传感特性测试实验仪器示意图如图4所示。在制备偏芯长周期光纤光栅的三维位移台上固定两个旋转光纤夹具,其中一个固定,另一个可以逆时针或者顺时针旋转 360° ,将光纤固定在两个夹具上,调整位置使偏芯长周期光纤光栅正好处于夹具正中央,拉紧光纤,保证其不受到横向剪切应力的影响。光纤的拉伸初始长度为 23 mm 。接通光源,记录下无扭转状态的传输光谱图,由于制备的光纤光栅在电弧放电过程中形成扭转结构,使得抗机械强度能力下降,在反复实验测试中发现当测试扭转范围为 $0\sim 360^\circ$ 时,传感器会出现偶尔断裂的现象,因此为了确保传感器在应用中的稳定性,将测试范围限定在 180° 之内。先顺时针旋转 36° ,直至顺时针旋转到 180° 。然后调整光纤夹具使角度归零再逆时针旋转,同样每次扭转角度为 36° ,直至扭转至 180° 。总共记录 11 次变化。

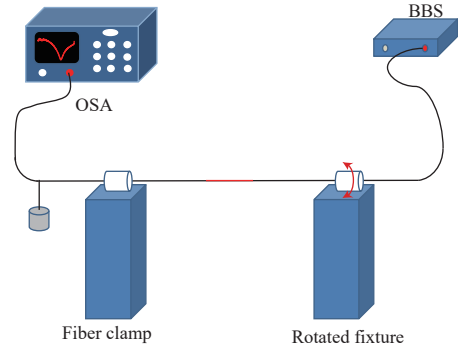
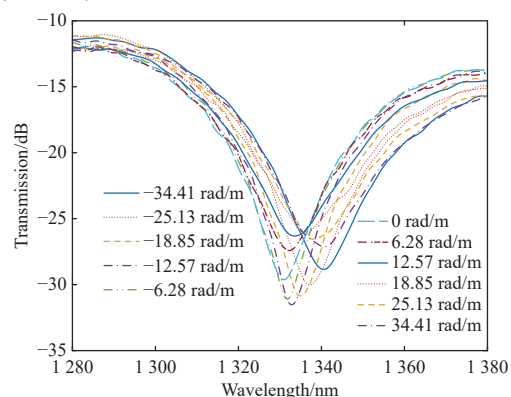


图4 扭转实验装置示意图

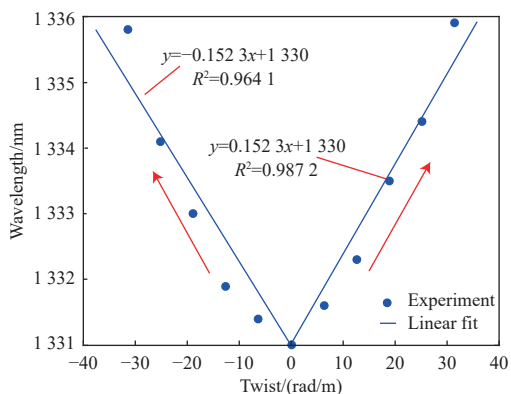
Fig. 4 Schematic diagram of torsion experimental setup

记录扭转过程中的数据并进行分析,如图5所示。由图5(a)和(b)可知,随着扭转角度的变化,MT-LPFG 谐振峰会发生微小的偏移,没有扭转时该谐振峰的波长为 1.2 nm ,在逆时针扭转过程中,波长随着扭转角度的增大逐渐增大,从 $0^\circ\sim -180^\circ$,该过程中扭转灵敏度为 $-0.1523\text{ nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。顺时针扭转过程中,从 0° 扭转至 180° ,该过程的扭转灵敏度为 $0.1523\text{ nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。可以看出,对于 MTL-PFG 没有扭转方向的辨别能力。对于 CMT-LPFG,由图5(c)和(d)可知,随着扭转角度的变化,光栅谐振峰的波长会发生漂移,从 $-180^\circ\sim 180^\circ$ 扭转过程中,扭转灵敏度为 $0.5921\text{ nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。且从光谱图中能够看出,顺时针扭转会使谐振峰加深,逆时针扭转会使谐振峰变浅。通过实验结果可以看出,对于 CMT-LPFG,当顺时针扭转时,光谱发生了红移,当逆时针扭转时,光谱发生了蓝移,具有

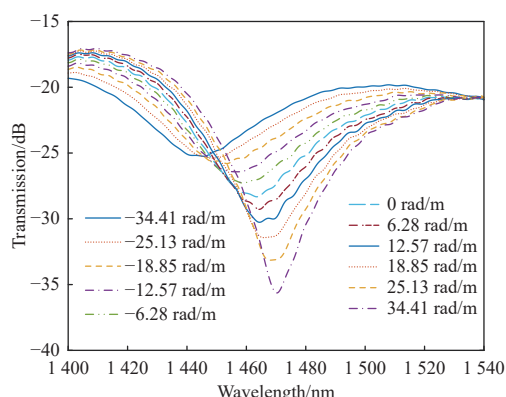
很好的方向辨别能力,而且扭转灵敏度提高了将近3倍。产生以上现象的原因主要是由于在微锥结构的基础上,引入了螺旋扭转结构。从图5(a)和(c)可以看出在测量扭转和温度的过程中,透射光谱没有发生畸变,说明传输模式没有改变。在温度和扭转变化的过程中引起机械结构和应力的变化,影响了光栅的周期和有效折射率值,进而改变了光纤中基膜和包层模式的耦合过程,实现了待测参数的测量。为了进一步验证本文提出的CMT-LPFG传感器的稳定性,本研究对其进行了6次独立的重复实验测试,得到的误差拟合曲线如图6所示,实验结果显示,传感器平均扭转灵敏度为 $0.5987\text{ nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$,呈现出较好的重复性和稳定性。



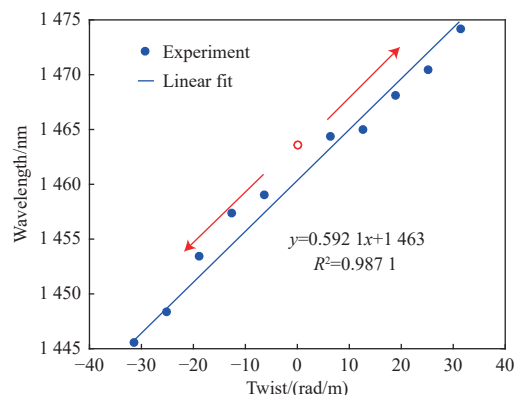
(a) MTL-PFG传输光谱图



(b) CMT-LPFG波长随扭转变量响应特性



(c) CMT-LPFG的传输光谱图



(d) CMT-LPFG波长随扭转变量响应特性

图5 扭转过程光谱变化及波长随着扭转变量的响应特性

Fig. 5 Spectral changes during torsion and wavelength response characteristics with torsion variables

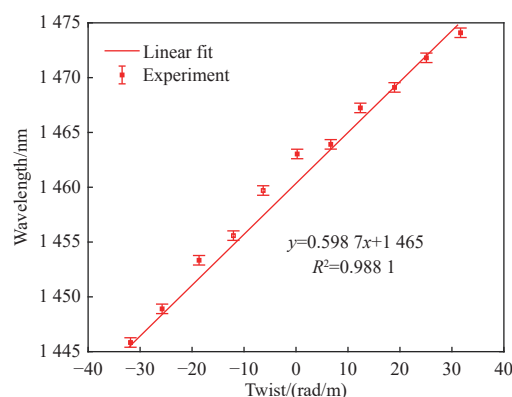
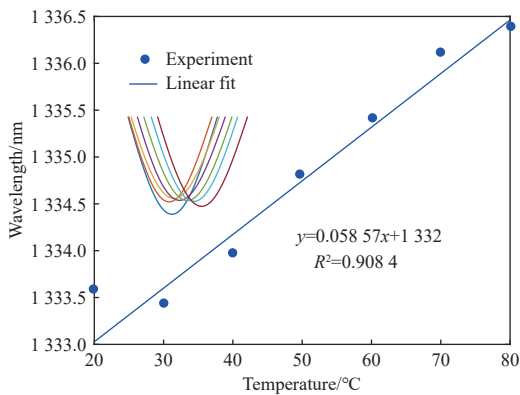


图6 扭转传感特性6次测试响应

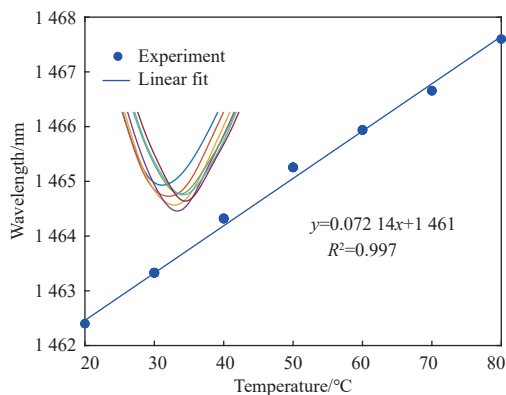
Fig. 6 Torsion response obtained from six independent repeated torsion sensing experiments

本文对传感器的温度特性进行了研究,将光纤两端固定在光纤夹具上,将传感器放入温控箱,光纤的一端接入光源,另一端接入光谱仪。接通温控箱电源使温度从 20°C 升高到 80°C ,温度间隔为 5°C ,每 5°C 记录一次光谱数据,直至温度升高至 80°C 。由图7可知,随着温度的上升,谐振峰发生红移且温度灵敏度为 $0.05857\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,线性拟合度为 0.9084 。对于扭转型LPFG,谐振峰也会发生红移且温度灵敏度为 $0.07214\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,对于扭转型和非扭转型LPFG来说温度响应有略微差别。为了验证本文提出的传感器温度稳定性对其进行了6次重复性温度实验测试,得到的实验结果如图8所示,平均温度灵敏度为 $0.0716\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,温度传感特性呈现出较好的线性度和重复性。

两种传感器的传感特性对比如表1所示。扭转型LPFG的扭转灵敏度更高,为 $0.5921\text{ nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$,而非扭转型LPFG的扭转灵敏度相对较低,并且在



(a) 非扭转LPFG波长随温度变化的响应特性



(b) 扭转LPFG波长随温度变化的响应特性

图7 温度变化过程温度变化的响应特性

Fig. 7 Response characteristics of temperature changes during temperature variation process

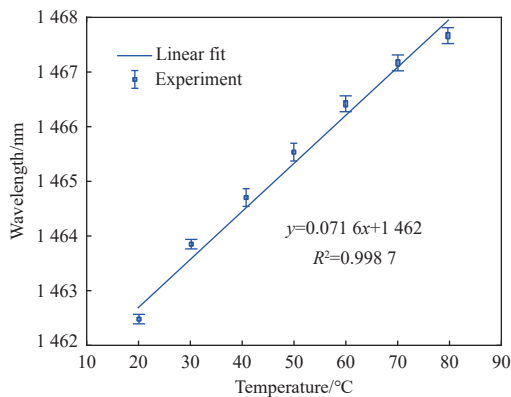


图8 温度传感特性6次测试响应

Fig. 8 Temperature response obtained from six independent repeated temperature sensing experiments

逆时针扭转和顺时针扭转时还各不相同,顺时针时灵敏度为 $0.152\ 3\ \text{nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$,逆时针时灵敏度为 $-0.152\ 3\ \text{nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。非扭转型 LPFG 的温度传感灵敏度为 $0.058\ 57\ \text{nm}/^\circ\text{C}$,扭转型 LPFG 的温度传感灵敏度为 $0.072\ 14\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。而且扭转型 LPFG 具有扭转方向的辨别能力。我们将本文提出的传感器

与其他类似结构的扭转传感器从尺寸以及灵敏度方面进行了对比,结果如表2所示。本文提出的传感器比其他类似结构的传感器扭转灵敏度高一个数量级左右,并且在尺寸上有很大优势,仅有 $3.25\ \text{mm}$,比其他传感器的尺寸小一个数量级。这主要是因为手性微锥结构使得传感器本身具有正向和反向的应力作用,增大了灵敏度。本文采用的是偏芯光纤,由于纤芯处于包层中,在制备手性微锥结构时,增强了倏逝波的作用,从而减小了尺寸。

表1 不同类型 LPFG 的扭转、温度灵敏度

Table 1 Torsional and temperature sensitivity of different types of LPFGs

Types of LPFGs	Sensing characteristics		
	Torsional sensitivity/ (rad/m)	Temperature sensitivity/ (nm/°C)	Direction discrimination ability
MTLPFG	$-0.152\ 3/0.152\ 3$	$0.058\ 57$	No
CMT-LPFG	$0.592\ 1$	$0.072\ 14$	Yes

表2 不同类型扭转传感器的敏感特性

Table 2 Sensitivity characteristics of different types of torsion sensors

Structure	Sensitivity/($\text{nm}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	Length/cm	Reference
Tilted LPFG	0.049	1.35	[21]
Helix LPFG	0.057	2.5	[22]
Twisted LPFG	0.117	30	[23]
Cascaded HLPFGs	$-0.141\ 4$	27.7	[24]
Helical LPFGs pair	0.115	5.4	[25]
Rotary LPFGs pair	0.084	23.5	[26]
CMT-LPFG	$0.592\ 1$	0.325	ours

3 结论

本文提出了基于手性结构的长周期光纤光栅,介绍了其基本传感原理,并对其结构进行了理论分析。制备了非扭转型 LPFG 和扭转型 LPFG,对这两个样品的扭转特性、温度特性进行了测试,并对数据进行了分析。由对比分析可知,与偏芯非扭转型长周期光纤光栅相比较,偏芯扭转型长周期光纤光栅具有更好的扭转传感特性和拉伸传感特性,并且偏芯扭转型长周期光纤光栅具有较低的温度响应特性,可以更好地适应外界环境温度,在进行其他传感特性测试时不受温度特性的影响,这也是偏芯扭转型长周期光纤光栅的一大优点。这一研究表明,偏芯扭转型长周期光纤光栅在传感中有着很大的优势,具有很好的发展前景。

参考文献:

- [1] ZHANG Y X, ZHANG W G, YAN T Y, et al. V-shaped long-period fiber grating high-sensitive bending vector sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(17): 1531-1534.
- [2] MAO G, YUAN T, GUAN C, et al. Fiber Bragg grating sensors in hollow single- and two-core eccentric fibers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 144-150.
- [3] 林静雨. 基于 D 型长周期光纤光栅的传感特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
LIN Jingyu. Study on sensing characteristics based on D-type long-period fiber grating[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [4] ZHANG Y T, JIANG Y I, YANG S Z D. All-sapphire fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of ultra-high temperature and high pressure[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 14826-14836.
- [5] HAN J, KIM J, LEE S L, et al. Strain-insensitive simultaneous measurement of bending and temperature based on cascaded long-period fiber gratings inscribed on double-clad fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(6): 7638-7647.
- [6] OUYANG Y, LIU J, XU X, et al. Phase-shifted eccentric core fiber Bragg grating fabricated by electric arc discharge for directional bending measurement[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, 18(4): 1168.
- [7] FU X H, ZHANG Y P, WANG Y F, et al. A temperature sensor based on tapered few mode fiber long-period grating induced by CO₂ laser and fusion tapering[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105825.
- [8] DING L, LI J, DENG Y, et al. An inline fiber curvature sensor based on eccentric core fiber and off-axis air cavity fabry-Pérot interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19: 8700-8705.
- [9] CHEN X F, ZHANG C, WEBB D J, et al. Highly sensitive bend sensor based on Bragg grating in eccentric core polymer fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 850-852.
- [10] ZHOU Y R, LIU X X, FAN L F, et al. Temperature and vibration insensitive fiber optic vector magnetic field sensor[J]. *Optics Communications*, 2023, 530: 129178.
- [11] JANIK M, KOBÁ M, KRÓL K, et al. Combined long-period fiber grating and microcavity in-line Mach-Zehnder interferometer for refractive index measurements with limited cross-sensitivity[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(8): 2431.
- [12] BANDYOPADHYAY S, DEL VILLAR I, BASUMALLICK N, et al. Long period fiber grating for biosensing: an improved design methodology to enhance add-layer sensitivity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1178-1184.
- [13] 黄新成, 吴小文, 高社成, 等. 角向二阶少模长周期光纤光栅的扭转响应特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1206001.
HUANG Xincheng, WU Xiaowen, GAO Shecheng, et al. Response characteristic of twisting second-azimuthal-order few-mode long-period fiber grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1206001.
- [14] WANG Y P, RAO Y J. A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(5): 839-843.
- [15] SUN J, CHAN C C, TAN K M, et al. Application of an artificial neural network for simultaneous measurement of bending curvature and temperature with long period fiber gratings[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 137(2): 262-267.
- [16] 徐小凤. 偏芯光纤长周期光栅及其特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
XU Xiaofeng. Study on long period grating of bias-core fiber and its characteristics[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [17] ZHU J L, YANG Y, ZUO M Q, et al. Few-mode gain-flattening filter using LPFG in weakly-coupled double-cladding FMF[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4439-4446.
- [18] KHUN-IN R, USUDA Y, JIRARAKSOPAKUN Y, et al. Coupled mode characteristics from the perturbation of 3D printed long-period fiber grating devices[J]. *Photonic Sensors*, 2020, 10(3): 195-203.
- [19] WEN Z, LIU X L, WEI H, et al. Measurement of temperature and concentration sensing characteristics based on dual-grating cascade structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 917006.
- [20] WEN H Y, CHEN J L, CHIANG C C. Square-wave long-period fiber grating fabricated with double-sided laser-assisted wet etching technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(13): 7082-7086.
- [21] TANG J, FU C L, BAI Z Y, et al. Sensing characteristics of tilted long period fiber gratings inscribed by infrared

- femtosecond laser[J]. [Sensors](#), 2018, 18(9): 3003.
- [22] ZHANG L, LIU Y Q, ZHAO Y H, et al. High sensitivity twist sensor based on helical long-period grating written in two-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(15): 1629-1632.
- [23] DUAN J, XIE Z, WANG C, et al. Torsion sensing characteristics of long period fiber gratings fabricated by femtosecond laser in optical fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 83: 94-98.
- [24] XIAN L L, WANG P, LI H P. Power-interrogated and simultaneous measurement of temperature and torsion using paired helical long-period fiber gratings with opposite helicities[J]. [Optics Express](#), 2014, 22(17): 20260-20267.
- [25] ZHANG H L, ZHANG W G, CHEN L, et al. Bidirectional torsion sensor based on a pair of helical long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(15): 1700-1702.
- [26] HUANG J W, LIU T, ZHANG Y Y, et al. Smartphone-based optical fiber fluorescence temperature sensor[J]. [Sensors](#), 2022, 22(24): 9605.