

激光与光电子学进展

基于预扭制保偏光纤 Sagnac 环形镜结构的 光纤扭转传感器

宋卓, 李依纯, 韦金朋, 胡君辉*

广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004

摘要 提出了一种基于预扭制保偏光纤(PMF) Sagnac 环形镜结构的光纤扭转传感器,该传感器可以同时实现扭转方向的判别和扭转角度的测量。此结构的传感部分由熔接在两段 2 mm 长的多模光纤(MMF)中间 2 cm 长预扭制的熊猫型 PMF 构成,通过透射光谱中谐振波谷波长或功率变化的测量,实现扭转方向判别和扭转角度的测量。实验结果表明,该传感器具有较高的灵敏度。逆时针扭转时,谐振波谷波长随着扭转角度的增大发生蓝移,波长灵敏度最大为 $-455 \text{ pm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$,功率灵敏度为 $-1.35 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$;顺时针扭转时,谐振波谷波长随着扭转角度的增大发生红移,波长灵敏度最大为 $182 \text{ pm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$,功率灵敏度为 $2.20 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$ 。该传感器具有结构和制作简单、成本低廉等优点,在扭转或者旋转测量领域具有潜在的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 保偏光纤; Sagnac 环; 扭转测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1706007

Optical Fiber Torsion Sensor Based on Pre-Twisted Polarization-Maintaining Fiber Sagnac Loop Mirror Structure

Song Zhuo, Li Yichun, Wei Jinpeng, Hu Junhui*

College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract An optical fiber torsion sensor based on a pre-twisted polarization-maintaining fiber (PMF) Sagnac loop mirror structure is proposed and experimentally demonstrated for simultaneously measuring rotational angle and direction. The sensing part of the structure is composed of a 2-cm pre-twisted Panda-type PMF spliced between two segments of 2-mm length multimode fiber (MMF). Torsion direction discrimination and torsion angle measurement can be realized by measuring the wavelength and power of a resonant dip in transmission spectra. The experimental results show that the sensor has a high sensitivity, and the resonant dip shifts with changes in torsion angle and direction. The wavelength of the resonant dip blue-shifts as the torsion angle increases, with a maximum wavelength sensitivity of $-455 \text{ pm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$ and a power sensitivity of $-1.35 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$ for counterclockwise torsion. For clockwise torsion, the wavelength of the resonant dip red-shifts as the torsion angle increases, with a maximum wavelength sensitivity of $182 \text{ pm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$ and a power sensitivity of $2.20 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$. The sensor has the advantages of simple structure, easy fabrication, low cost, and potential applications in the field of torsion or rotation measurement.

Key words fiber optics; fiber-optic sensor; polarization-maintaining fiber; Sagnac loop; twist measurement

OCIS codes 060.2370; 060.2420; 280.4788

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2020-12-02; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61565002)、广西重点研发计划(AB18221033)、广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划(20181127)

通信作者: *hujh@mailbox.gxnu.edu.cn

1 引言

扭转是一个非常重要的物理参量,在建筑结构健康监测^[1-2]、连续体机器人^[3-4]等领域有着举足轻重的作用。光纤传感器具有电学类传感器无法比拟的优势,例如抗电磁干扰、耐辐射、体积小、方便嵌入被测结构等,因此受到广泛的关注。

光纤扭转传感器有许多类型,最为常见的是一种利用光纤光栅作为传感单元实现扭转监测的光纤扭转传感器^[5]。2018年,Yang等^[6]制备了基于多模长周期光栅(LPG)和倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)的扭转传感器。他们分析前向传播的 LP_{11} 模与后向的 LP_{11} 模和 LP_{21} 模之间的模式耦合对TFBG透射强度的影响并用于测量扭转,在扭率为 $-5.23\sim 5.23$ rad/m时,获得了 1.074 dB \cdot rad $^{-1}\cdot$ m的扭曲灵敏度。1年后,他们^[7]还将少模倾斜光纤布拉格光栅(FM-TFBG)和少模长周期光纤光栅(FM-LPG)级联,制备了扭转传感器,在旋转角度为 $-40^\circ\sim 40^\circ$ 时,扭转灵敏度可达 0.16 dB/($^\circ$)。但是光纤光栅的制作需要用到价格昂贵且需精密控制的飞秒激光^[8]或氩离子激光器和掩模板,成本较高。

另一种是通过将特种光纤作为传感单元实现模间干涉的光纤传感器。2010年,Fu等^[9]提出了一种基于保偏光子晶体光纤(PM-PCF)的全光偏振扭转传感器。该结构将PM-PCF直联到光路中,在旋转角度为 $30^\circ\sim 70^\circ$ 时,获得了 0.014 dB/($^\circ$)的灵敏度。2013年,Song等^[10]将一段方形无芯光纤夹熔在单模光纤两端,制成基于模间干涉的全光纤扭转传感器。2015年,Zhou等^[11]提出一种基于熊猫型保偏光纤预扭制拉锥的光纤扭转传感器,在扭率为 $0\sim -8$ rad/m和 $0\sim 8$ rad/m时,分别获得了 2.392 nm \cdot rad $^{-1}\cdot$ m和 1.071 nm \cdot rad $^{-1}\cdot$ m的高灵敏度。2018年,Kang等^[12]则提出了一种强度解调扭转传感器。该传感器将环状的偏振器作为传感部分,薄芯保偏光纤作为解调部分,获得的最大灵敏度约为 0.29 dB/($^\circ$)。同年,Zhang等^[13]将一段七芯光纤(SCF)对芯熔接在两段极短的多模光纤之间,制成具有SMF-MMF-SCF-MMF-SMF(SMSMS)结构,并对七芯光纤进行预扭 720° 的光纤扭转传感器,可在扭率为 $-17.094\sim 15.669$ rad/m时定向测量,并获得 0.118 nm \cdot rad $^{-1}\cdot$ m的灵敏度。2019年,Liu等^[14]也提出一种对应变不敏感、可实现扭转和温度同时测量的SMSMS结构光纤

传感器。该传感器可在扭率为 $4.758\sim 40.439$ rad/m时,获得 400 pm \cdot rad $^{-1}\cdot$ m的灵敏度。以上传感器均利用特殊光纤制成的Mach-Zehnder结构进行扭转测量,此外,还有基于Sagnac环结构^[15-16]和采用材料涂覆增敏^[17]的光纤扭转传感器也先后被报道。

本文提出了一种基于预扭制PMF的Sagnac环,可同时实现扭转方向判别和扭转角度测量的光纤扭转传感器。该结构的传感部分由熔接在两段 2 mm长的多模光纤(MMF)中间 2 cm长的熊猫型保偏光纤(PMF)制成,对PMF中间长约 3 mm的区域进行 180° 的旋转预扭制。通过对透射光谱谐振波谷的波长或功率变化进行测量来实现扭转方向判别和扭转角度的解调。实验结果表明:该传感器具有较高的灵敏度,透射谱的波谷随着扭转角度和扭转方向的变化而改变。逆时针扭转时,谐振波谷波长随着扭转角度的增大发生蓝移,波长灵敏度最大为 -64 pm/($^\circ$)(-455 pm \cdot rad $^{-1}\cdot$ m),功率灵敏度为 -0.19 dB/($^\circ$)(-1.35 dB \cdot rad $^{-1}\cdot$ m);顺时针扭转时,谐振波谷波长随着扭转角度的增大发生红移,波长灵敏度最大为 25.6 pm/($^\circ$)(182 pm \cdot rad $^{-1}\cdot$ m),功率灵敏度为 0.31 dB/($^\circ$)(2.20 dB \cdot rad $^{-1}\cdot$ m)。通过相应的谐振波谷波长的漂移量或是功率的变化即可对旋转的角度进行测量。该传感器仅用商用熔接机(藤仓60S)和丁烷打火机完成制作,具有工艺简单、结构紧凑、成本低廉、结构强度高优点,在扭转或者旋转测量领域中具有潜在的应用前景。

2 实验装置和原理

2.1 实验装置

测试扭转的实验装置如图1所示。传感器的输入端使用的是宽带光源(BBS;型号GM8035),解调端使用的是光谱分析仪(OSA;型号AQ6370C)。BBS输出的激光由1端口进入到3 dB耦合器并分为两束传播方向相反的激光。当激光经过传感结构时,激光从SMF进入MMF,由于模场不匹配,MMF中会存在激光的多种高阶模式,从MMF进入PMF时,一部分模式的光进入到PMF的纤芯,另一部分则继续在PMF的包层中传播。当进入第二段MMF时,这两部分光被重新耦合到SMF中,这两束光分别在Sagnac环形镜结构传输一周后经3 dB耦合器耦合输出到OSA中,最后通过OSA对干涉谱进行测量。为了减小偏振态的影响,Sagnac环形

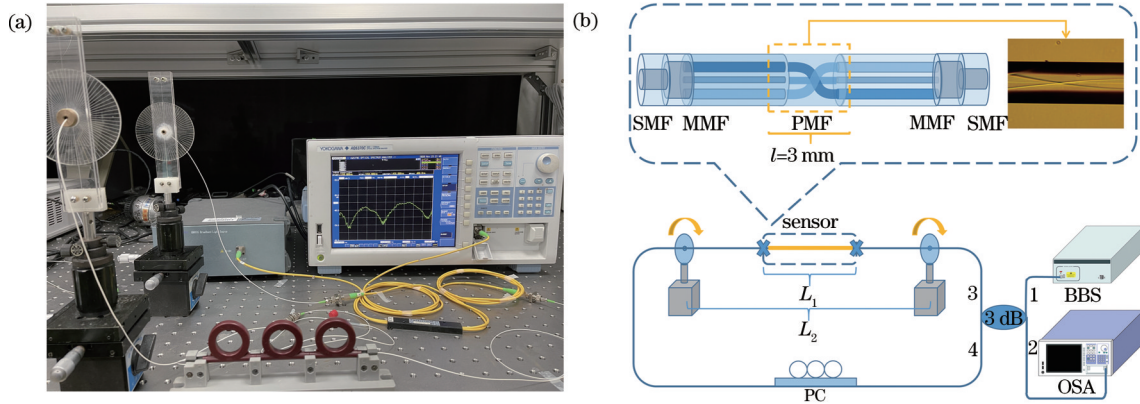


图 1 实验装置。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 1 Experimental setup. (a) Picture of real products; (b) schematic diagram

镜结构中加入了一个偏振控制器(PC),以保证 Sagnac 环形镜输出的光场为某一特定的偏振态。

实验中,旋转的加载是通过两个旋转夹具实现的。两个旋转夹具之间的间距 L_2 约为 12.4 cm。测试旋转角度时,将一边的旋转夹具固定,另一边的旋转夹具旋转来实现扭转角度加载于传感器上的目的。为了获得更高的扭转灵敏度和对扭转方向的识别,实验结构的 PMF 中心部分被预扭制 180°。预扭的制作过程是:将旋转夹具顺时针旋转 180°后利用丁烷打火机加热 PMF 中央区域,使其在熔融状态下形成螺旋结构。螺旋结构如图 1 所示。螺旋结构放置于显微镜下观察,在“预扭制”区域中可以观察到应力区被均匀扭转,而纤芯部位由于处在中心位置,几乎未被扭转。通过测量可以得到,整个被扭转的区域约为 3 mm 长。

2.2 传感原理

选用的 PMF 为熊猫型保偏光纤 (PM1550-HP), PMF 的包层直径为 125 μm , 纤芯直径为 8.5 μm 。MMF 则是大芯径多模光纤,包层直径为 125 μm , 纤芯直径为 105 μm 。传感部分利用熔接机(藤仓 60S)将 PMF 熔接在两段 MMF 之间,两端分别和单模光纤熔接形成 SMF-MMF-PMF-MMF-SMF (SMPMS) 结构,然后再用 3 dB 耦合器将 SMPMS 两端连接起来构成 Sagnac 环形镜结构。

对于 Sagnac 环结构,透射光强 $I_t^{[18]}$ 可表示为

$$I_t = \frac{I_{in}(1 - \cos \varphi)}{2}, \quad (1)$$

式中: I_{in} 为入射光强; φ 为该系统传感结构所产生的总相位差。由于引入了 SMPMS 结构,光从 MMF 进入到 PMF 中时,一部分的光会沿着纤芯继续传

播,另外一部分会进入到 PMF 的包层中,而后再经过 MMF 继续传播再返回耦合器耦合,因此 $\varphi^{[18]}$ 可以表示为

$$\varphi = \varphi_{MMF} + \varphi_{PMF} = \frac{2\pi L_{MMF} \Delta n_{MMF}}{\lambda} + \frac{2\pi L_{PMF} B_{PMF}}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: φ_{MMF} 、 φ_{PMF} 分别是 MMF、PMF 引起的相位差; L_{MMF} 、 L_{PMF} 分别是 MMF、PMF 的长度; Δn_{MMF} 是多模光纤包层和纤芯有效折射率差; B_{PMF} 是 PMF 的双折射系数,它的大小等于保偏快慢轴的有效折射率差。当相位差 $\varphi = 2m\pi$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ 时,满足干涉条件,干涉波谷的中心波长表示为

$$\lambda = \frac{L_{PMF} B_{PMF} + L_{MMF} \Delta n_{MMF}}{m}. \quad (3)$$

当外界的旋转扭力作用于结构时,MMF 的纤芯和包层的有效折射率及 PMF 快慢轴的纤芯和包层的有效折射率均会发生改变。着重分析 PMF 引起的相位变化。设 x 轴和 y 轴分别为 PMF 的快轴和慢轴方向,根据轴角假设保偏的快慢轴为椭圆分布^[11],如图 2(a)所示,有

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (4)$$

$$x = a \cdot \cos \theta, y = b \cdot \sin \theta, \quad (5)$$

$$\begin{cases} a = \Delta n_{PMF}^f = n_{PMF}^{f,co} - n_{PMF}^{f,cl} \\ b = \Delta n_{PMF}^s = n_{PMF}^{s,co} - n_{PMF}^{s,cl} \end{cases}. \quad (6)$$

纤芯模与包层模之间的相位差^[11]可以近似表示为

$$\varphi_{PMF} = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-\frac{l_2}{2}}^{\frac{l_2}{2}} \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} dz, \quad (7)$$

$$\theta = \begin{cases} -\frac{l_1}{2}(\alpha + \beta) + (z + \frac{l_1}{2})\beta, & -\frac{l_2}{2} \leq z < -\frac{l_1}{2} \\ (\alpha + \beta)z, & -\frac{l_1}{2} \leq z < \frac{l_1}{2} \\ \frac{l_1}{2}(\alpha + \beta) + (z - \frac{l_1}{2})\beta, & \frac{l_1}{2} \leq z < \frac{l_2}{2} \end{cases}, \quad (8)$$

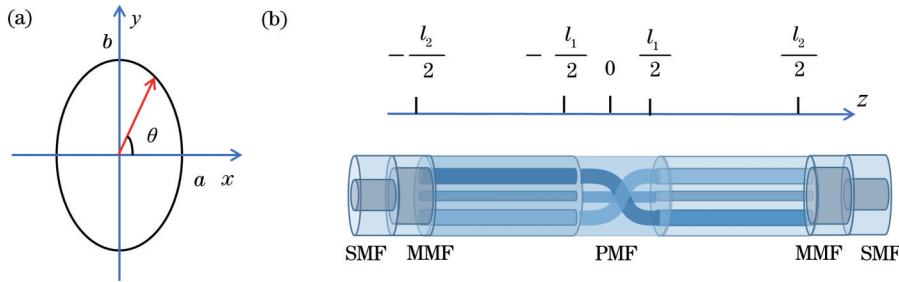


图 2 光纤结构的截面图和横向坐标图。(a)截面图；(b)横向坐标图

Fig. 2 Cross section and horizontal coordinate of optical fiber structure. (a) Cross section; (b) horizontal coordinate

由(3)式可知,PMF 的长度会直接影响传输光谱波谷的位置,从而影响到自由谱宽。同理,两段 MMF 的长度也会影响该传感器的性能。实验中为了使得 2 个 MMF 中既能存在高阶模式,又不影响到光谱干涉条纹的对比度,经过多次实验,MMF 和 PMF 的长度分别为 2 mm 和 2 cm 时,光谱图最好,干涉条纹清晰可见,并且具有较好的消光比,传感结构的总长度 $L_1=2.4 \text{ cm}$ 。

3 实验结果与分析

首先分析了保偏光纤预扭制与否对传感结构透射光谱的影响。实验中 MMF 和 PMF 的长度分别为 2 mm 和 2 cm,传感结构的总长度 $L_1=2.4 \text{ cm}$,在对整个传感结构未加载旋转角度的情况下,分别对保偏光纤未扭制和预扭制(扭转角度为 180°)两种传感结构进行旋转角度的测量,实验结果如图 3 所示。由图 3 可知:保偏光纤未预扭制传感结构的透射谱自由谱宽约为 8 nm,谐振波谷消光比为 14 dB;保偏光纤预扭制传感结构的透射谱的自由谱宽约为 9 nm,谐振波谷消光比约为 17 dB,比保偏光纤未预扭制的传感结构透射谱的谐振波谷消光比提高了 3 dB,说明对保偏光纤进行预扭制可以提高传感器谐振波谷的消光比。为了分析参与干涉的模式成分,对透射谱进行快速傅里叶变换(FFT),由图 3 可知,保偏光纤预扭制和未扭制传感结构的空

式中: α 和 β 分别为传感器的预扭转扭率和传感器受到扭转的扭率; l_2 是整个 PMF 的长度, l_1 则是预扭制区域的 PMF 的长度,如图 2(b)所示。由(7)式分析可以得出,随着扭转的角度发生改变,PMF 引起的相位差也会发生改变,从而导致干涉条纹发生改变。

是光纤的包层模,保偏光纤预扭制的传感结构的包层模强度略大于保偏光纤未扭制的传感结构,使得保偏光纤预扭制的传感结构中参与干涉的纤芯模和包层模的强度差更小,干涉条纹的可见度更高,即谐振波谷消光比较高。

然后对保偏光纤未预扭制的传感结构进行旋转角度测量实验。在实验中,传感结构固定在两个可旋转夹具之间,定义扭转角度与预扭制方向同向为正角度,反之则为负角度。实验测量时,从 0° 开始旋转,分别旋转至 30° 和 -30° ,旋转的步长为 5° ,实验结果如图 4 所示,选取波长在 1344 nm 附近的谐振波谷作为测量解调对象。从图 4(a) 可以看到:当对传感结构施加逆时针扭转($0^\circ \sim -30^\circ$)时,谐振波谷发生红移,功率上升;顺时针扭转($0^\circ \sim 30^\circ$)时,谐振波谷的波长发生蓝移,功率下降。整体上可以看出,所施加旋转角度在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 时,谐振波谷发生蓝移,功率近似线性降低,通过线性拟合,可以得到谐振波谷对扭转的波长灵敏度为 $-6 \text{ pm}/(^\circ)$ ($-43 \text{ pm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$),功率灵敏度为 $-0.08 \text{ dB}/(^\circ)$ ($-0.57 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$)。通过谐振波谷的漂移方向可以判别所施加扭转角度的方向。

为了验证对保偏光纤进行预扭制可以提高传感器的灵敏度,对保偏光纤预扭制 180° 的传感结构进行了旋转角度测量实验。当顺时针扭转($0^\circ \sim 30^\circ$,扭转步长为 5°)传感结构时,实验结果如图 5 所示,随着扭转角度增大,谐振波谷波长发生红移,波

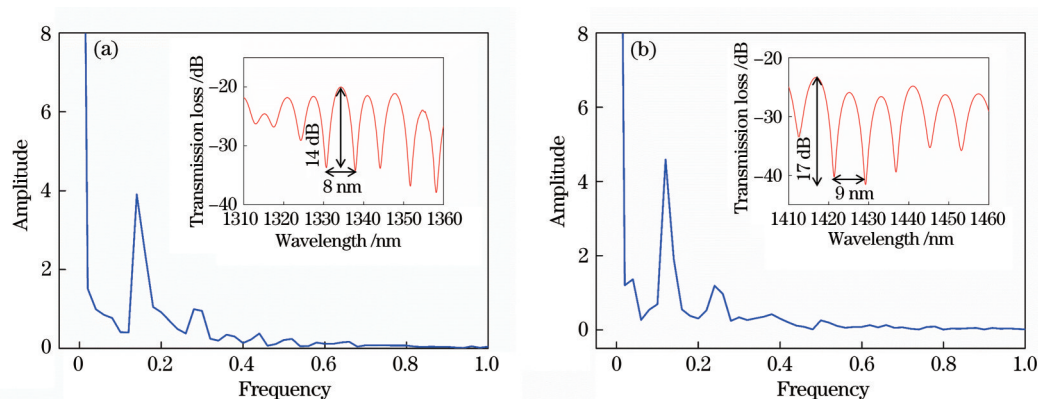


图 3 未预扭制及预扭制传感结构的透射光谱图及对应的 FFT 图。(a)未预扭制; (b)预扭制

Fig. 3 Transmission spectrum and corresponding FFT figure of sensing structure with and without pre-twist. (a) Without pre-twist process; (b) with pre-twist process

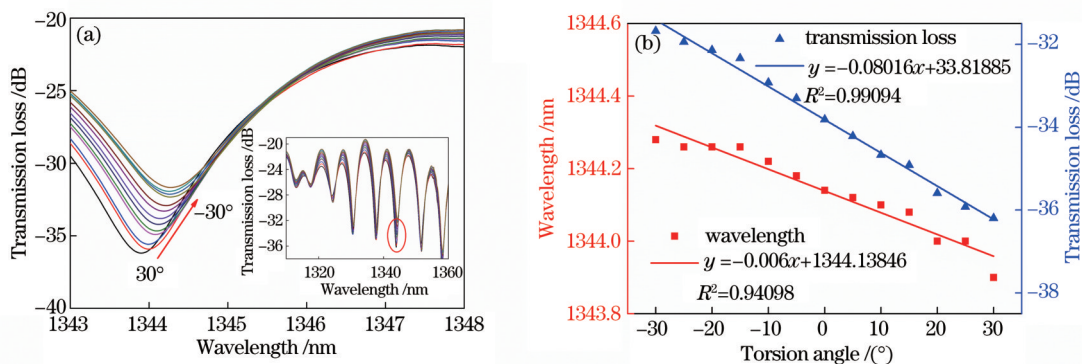


图 4 无预扭制结构的谐振波谷对扭转角度的响应图及拟合图。(a)透射光谱及波谷随扭转角度的变化; (b) 扭转角度功率及波长的拟合图

Fig. 4 Response diagram and fitting diagram of dip to the torsion without pre-twist process. (a) Spectra shift with the change of the torsion; (b) wavelength and power fitting diagram of the dip to torsion

长灵敏度为 $25.6 \text{ pm}/(^{\circ})$ ($182 \text{ pm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$), 功率灵敏度为 $0.31 \text{ dB}/(^{\circ})$ ($2.20 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$)。当逆时针扭转 ($0^{\circ} \sim -30^{\circ}$, 扭转步长为 5°) 传感结构时, 实验结果如图 6 所示, 随着扭转角度 (角度绝对值) 增大, 谐振波谷波长发生蓝移, 波长灵敏度为 $-64 \text{ pm}/(^{\circ})$ ($-455 \text{ pm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$), 功率灵敏度为 $-0.19 \text{ dB}/(^{\circ})$ ($-1.35 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}$)。通过谐振波谷的漂移方向可以判别所施加扭转角度的方向。两个方向上的灵敏度不一样, 原因主要是预扭制的方向有较大的影响。顺时针扭转与预扭制的方向一致, 由于弹性限度的限制, 扭转加载到传感区域形成的微应变更小, 灵敏度较低; 而在逆时针扭转时, 与预扭制方向相反, 此时扭转加载到传感区域形成的微应变更大, 此时灵敏度更高。但是不管是顺时针还是逆针对传感结构施加扭转, 传感器的灵敏度都比保偏光纤未预扭制的传感结构灵敏度高 4~6 倍。实验

结果说明, 对保偏光纤进行预扭制可以提升传感器的灵敏度。

将传感结构平直放入水浴锅中加热, 测试其对温度的响应。测试温度为 $25 \sim 65^{\circ}\text{C}$, 间隔为 5°C , 并且为保证测量数据的可靠性, 温度稳定约 30 min 后通过光谱仪记录对应的光谱图, 如图 7 所示。可以发现, 谐振波谷随着温度的升高发生红移, 对 1420 nm 波段的波谷进行拟合, 可得到波长的温度灵敏度为 $0.1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。功率的变化与温度不成线性关系, 但在 $40 \sim 65^{\circ}\text{C}$ 时功率基本保持不变。因此后续可通过级联光纤光栅 (FBG) 解决温度的交叉敏感问题或者实际使用时应在恒温环境下。

综上所述, 此传感器可以通过波长的蓝移和红移辨别扭转的方向, 并通过波长的漂移量或功率变化量解调扭转角度。为了对比本传感器的性能,

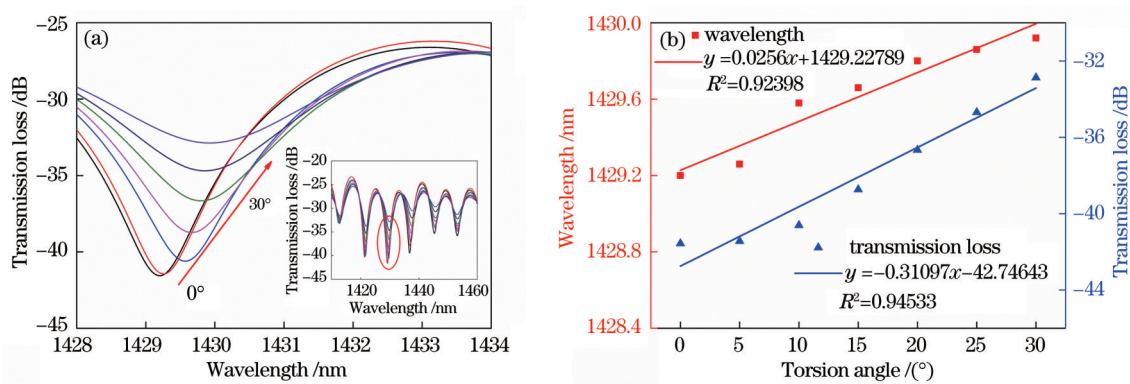


图 5 预扭制结构的谐振波谷对顺时针扭转的响应图及拟合图。(a) 光谱随扭转角度 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的变化而变化；(b) 扭转角度功率及波长的拟合图

Fig. 5 Response diagram and fitting diagram of dip to the clockwise torsion with pre-twist process. (a) Spectra shift with the clockwise twisting in the range of $0^\circ \sim 30^\circ$; (b) wavelength and power fitting diagram of the dip to torsion

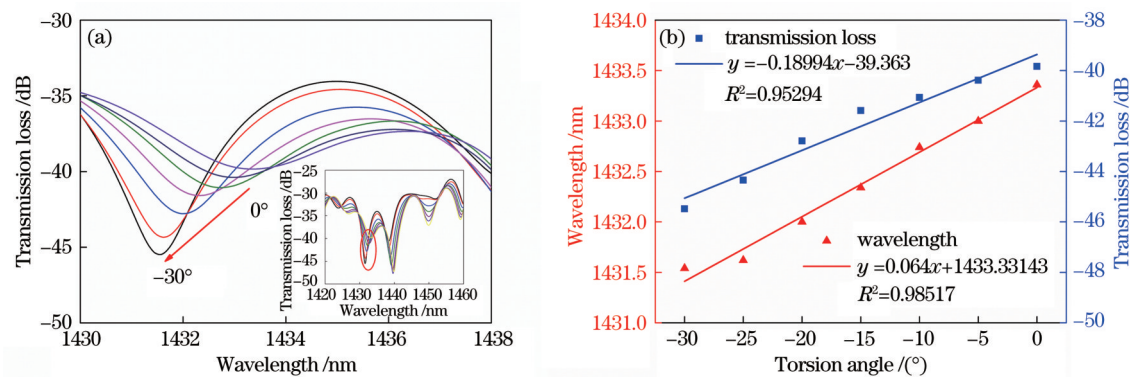


图 6 预扭制结构的谐振波谷对逆时针扭转的响应图及拟合图。(a) 光谱随着扭转角度 $0^\circ \sim -30^\circ$ 的变化而变化；(b) 波长与功率的拟合图

Fig. 6 Response diagram and fitting diagram of dip to the counter-clockwise torsion with pre-twist process. (a) Spectra shift with the counter-clockwise twisting in the range of $0^\circ \sim -30^\circ$; (b) wavelength and power fitting diagram of the dip to torsion

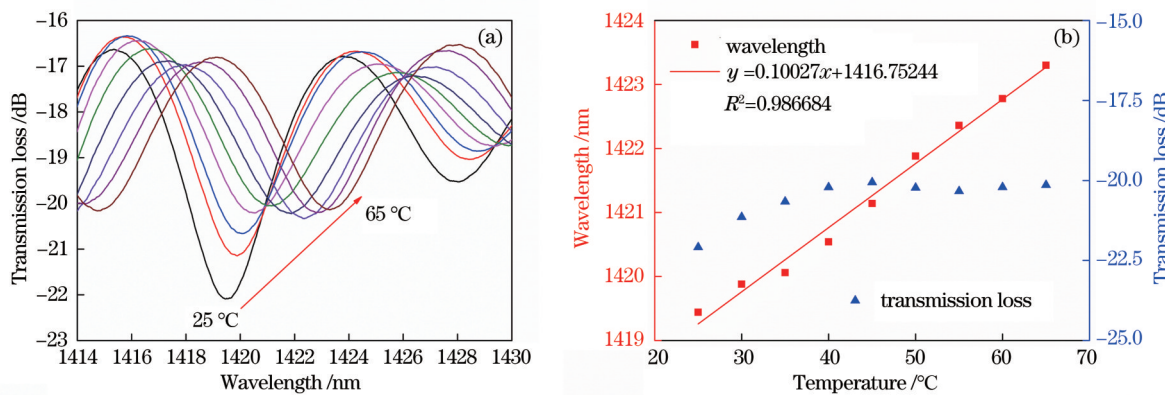


图 7 预扭制结构的谐振波谷对温度的响应图及拟合图。(a) 光谱随着温度 $25 \sim 65^\circ\text{C}$ 的变化而变化；(b) 波长与功率的拟合图

表 1 给出了近年来已报道的类似传感结构的实验结果(为方便对比,已统一单位)。通过对比可得,所提传感器较其他传感器获得的灵敏度较好,可以通

过谐振波谷的波长漂移量或功率的变化量对旋转角度进行测量,并通过谐振波谷波长的漂移方向实现对扭转方向的判别。

表 1 扭转传感器的性能对比

Table 1 Performance comparison of the reported torsion sensors

Sensor structure	Sensitivity	Direction discrimination	Reference
LPG and TFBG	1.074 dB·rad ⁻¹ ·m	NO	[6]
FM-TFBG and FM-FBG	0.16 dB/(°)	YES	[7]
PM-PCF	0.014 dB/(°)	NO	[9]
Square-NCF	1.28615 nm·rad ⁻¹ ·m	NO	[10]
Taper-PMF	2.392 nm·rad ⁻¹ ·m	YES	[11]
PC with PMF	0.29 dB/(°)	NO	[12]
MMF-SCF-MMF	0.118 nm·rad ⁻¹ ·m	YES	[13]
MMF-SCF-MMF	400 pm·rad ⁻¹ ·m	YES	[14]
HB-PCF in Sagnac	0.059 nm·rad ⁻¹ ·m	YES	[15]
SLPCF in Sagnac	0.9354 nm/(°)	YES	[16]
HCF with Pb	0.1 dB/(°)	NO	[17]
MMF-PMF(pre-twist)-MMF	455 pm·rad ⁻¹ ·m 2.20 dB·rad ⁻¹ ·m	YES	This work

4 结 论

提出了一种基于预扭制 PMF 的 SMPMS 结构内置于 Sagnac 环结构的光纤扭转传感器。该传感器可以同时实现扭转方向的判别和扭转角度的测量。该结构由熔接在两段 2 mm 长的 MMF 中间 2 cm 长预扭制的熊猫型 PMF 构成, 可通过透射光谱谐振波谷的波长或功率的测量实现扭转方向判别和扭转角度的测量。在逆、顺时针两不同方向的旋转下, 谐振波谷分别产生蓝移和红移, 波长的灵敏度最高可达到 -64 pm/(°) (-455 pm·rad⁻¹·m) 和 25.6 pm/(°) (182 pm·rad⁻¹·m), 功率的灵敏度最高可达到 -0.19 dB/(°) (-1.35 dB·rad⁻¹·m) 和 0.31 dB/(°) (2.20 dB·rad⁻¹·m)。该传感器具有结构和制作简单、成本低廉、结构强度高优点, 在扭转或者旋转测量领域具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

[1] Wang G, Pran K, Sagvolden G, et al. Ship hull structure monitoring using fibre optic sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(3): 472-478.

[2] Lu H L, Hu J H. High sensitivity curvature sensor based on SPS fiber structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080601.
陆杭林, 胡君辉. 基于 SPS 光纤结构的高灵敏度曲率传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080601.

[3] Xu R, Yurkewich A, Patel R V. Curvature, torsion, and force sensing in continuum robots using helically

wrapped FBG sensors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1(2): 1052-1059.

[4] Bai H D, Li S, Barreiros J, et al. Stretchable distributed fiber-optic sensors[J]. Science, 2020, 370(6518): 848-852.

[5] Huang X C, Wu X W, Gao S C, et al. Response characteristic of twisting second-order azimuthal-order few-mode long-period fiber grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1206001.
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.

[6] Yang K, Liu Y G, Wang Z, et al. Twist sensor based on long period grating and tilted Bragg grating written in few-mode fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-8.

[7] Yang K, Liu Y G, Wang Z, et al. Fiber laser twist sensor with hybrid few-mode tilt Bragg grating and few-mode long period grating[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(3): 161-164.

[8] Li H Y, Rao B Y, Zhao X F, et al. Development of fiber gratings inscribed by femtosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111420.
李宏业, 饶斌裕, 赵晓帆, 等. 基于飞秒激光刻写光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111420.

[9] Fu H Y, Khijwania S K, Tam H Y, et al. Polarization-maintaining photonic-crystal-fiber-based all-optical polarimetric torsion sensor[J]. Applied Optics, 2010, 49(31): 5954-5958.

- [10] Song B B, Miao Y P, Lin W, et al. Multi-mode interferometer-based twist sensor with low temperature sensitivity employing square coreless fibers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26806-26811.
- [11] Zhou Q, Zhang W G, Chen L, et al. Fiber torsion sensor based on a twist taper in polarization-maintaining fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23877-23886.
- [12] Kang X X, Zhang W G, Zhang Y X, et al. Intensity-demodulated torsion sensor based on thin-core polarization-maintaining fiber[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3474-3478.
- [13] Zhang H L, Wu Z F, Shum P P, et al. Directional torsion and temperature discrimination based on a multicore fiber with a helical structure[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 544-551.
- [14] Liu C, Jiang Y J, Du B B, et al. Strain-insensitive twist and temperature sensor based on seven-core fiber[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 290: 172-176.
- [15] Kim H M, Kim T H, Kim B, et al. Temperature-insensitive torsion sensor with enhanced sensitivity by use of a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(20): 1539-1541.
- [16] Chen W G, Lou S Q, Wang L W, et al. Highly sensitive torsion sensor based on Sagnac interferometer using side-leakage photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1639-1641.
- [17] Liu D J, Wu Q, Han W, et al. Strain independent twist sensor based on uneven platinum coated hollow core fiber structure[J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19726-19736.
- [18] Lu H L, Yue Y L, Du J, et al. Temperature and liquid refractive index sensor using P-D fiber structure-based Sagnac loop[J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 18920-18927.