

基于光子晶体光纤环镜的光纤传感器的研究及进展

陈益新 赵春柳* 刘星 龚华平 董新永

(中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 对国内外已报道的基于光子晶体光纤环镜的光纤传感器进行了综述。总结了多种基于光子晶体光纤环镜的光纤传感器,包括应力、温度、微弯、扭曲和气压传感器。介绍了各种传感器的原理和优势,并对基于光子晶体光纤环镜的光纤传感器的发展进行了展望。

关键词 光纤光学;高双折射光子晶体光纤;低双折射光子晶体光纤;光纤环镜;光纤传感器

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.010005

Research and Development of Optical Fiber Sensors Based on Photonic Crystal Fiber Loop Mirrors

Chen Yixin Zhao Chunliu Liu Xing Gong Huaping Dong Xinyong

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract The reported optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors are reviewed. We summarize various sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors, including strain sensors, temperature sensors, curvature sensors, twist sensors and pressure sensors. The principles and advantages of these sensors are introduced. The prospect of development of optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors is addressed.

Key words fiber optics; high birefringence photonic crystal fiber; low birefringence photonic crystal fiber; fiber loop mirror; optical fiber sensor

OCIS codes 060.5295; 060.2370

1 引言

光子晶体光纤(PCF)也称微结构光纤,是近年的研究热点^[1,2]。典型的PCF包含很多沿光纤轴向分布的空气孔,因此可以通过改变空气孔的大小、形状、位置以及分布得到具有不同优良特性的传输光纤。PCF已在众多领域得到了很好的应用^[3~7]。

光纤环镜(FLM)广泛应用于光纤通信^[8,9]与传感装置^[10~14]中。光纤环镜可由一根保偏光纤和一个3 dB耦合器组成。入射光由3 dB耦合器分为两个反向传输的光信号,两束光经过保偏光纤后产生相位延迟,当它们再次进入3 dB耦合器时发生干涉,光谱形成明暗相间的条纹,即表现出梳状滤波的特性,而外加应力、温度等物理量可以改变FLM的光程差,所以FLM可以作为传感单元。此外在FLM中,两个反向传输的光经过同一根光纤发生干涉,由于经过的环境完全相同,因此可以有效消除外界干扰。最近一些基于PCF的FLM被提出并广泛应用于多种光纤传感器中^[15~20]。本文总结了多种基于高双折射(HiBi)光子晶体光纤环镜(PCF FLM)和低双折射(LoBi)PCF FLM的光纤传感器,包括应力^[15,16]、气压^[17]、温度^[18]、微

收稿日期: 2011-08-02; 收到修改稿日期: 2011-09-18; 网络出版日期: 2011-11-22

基金项目: 国家973计划(2010CB327804)、浙江省教育厅重点项目(Z200909231)和浙江省钱江人才计划(QJD0902005)资助课题。

作者简介: 陈益新(1988—),男,本科生,主要从事光子晶体光纤和光纤传感器等方面的研究。

E-mail: jeasonwill@163.com

*通信联系人。E-mail: zhchunliu@hotmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

弯^[19,20]和扭曲^[21]等光纤传感器,并介绍了 PCF FLM 光纤传感器的最新进展。

2 原理

如图 1 所示,入射光由 3 dB 耦合器平分分为两个反向传输的光信号,两束光经过 PCF 后产生相位延迟。两束光之间的相位延迟为^[22~24]

$$\theta = 2\pi BL/\lambda, \quad (1)$$

式中 B , L 和 λ 分别为 PCF 的双折射、长度和光波长。在 B 随波长变化很小时, $B = |n_x - n_y|$, 其中 n_x 和 n_y 分别是两束偏振光在 PCF 中的折射率。在忽略 3 dB 耦合器的插入损耗、PCF 的衰减和环中单模光纤(SMF)的情况下, PCF FLM 的透射谱呈周期性变化:

$$T = (1 - \cos \theta)/2, \quad (2)$$

透射谱的谐振谷满足公式 $2\pi BL/\lambda_{\text{dip}} = 2k\pi$, 其中 k 为任意整数。则谐振谷的波长可表示为

$$\lambda_{\text{dip}} = BL/k. \quad (3)$$

两个透射谐振谷的波长间距为

$$S = \lambda^2/(BL). \quad (4)$$

当应力、温度等变化量作用于 PCF 传感单元上时,就会引起双折射变化 ΔB 和 PCF 长度变化 ΔL , λ_{dip} 的变化为

$$\Delta\lambda_{\text{dip}} = (\Delta BL + B\Delta L)/k. \quad (5)$$

因此,被测物理量可以通过测量输出光谱得到。

3 FCF FLM 传感器应用

3.1 基于 HiBi-PCF FLM 的温度不敏感应力传感器

图 2 给出了 HiBi-PCF FLM 应力传感器^[15]的实验装置。实验所用 HiBi-PCF 由 Blaze-Photonics 提供,图 2 插图给出了其截面。两个相互垂直的模场直径分别为 3.6, 3.1 μm 。PCF 的双折射在光波长 1550 nm 处约为 8.6×10^{-4} 。HiBi-PCF 两端与普通 SMF 熔接。由于 PCF 与 SMF 的模场半径与数值孔径的不匹配, PCF 每一端与 SMF 间的熔接存在较大损耗(约为 3 dB), 可以通过预拉锥工艺减少熔接损耗。整个 FLM 插入损耗约为 6 dB。

以宽带光源作为入射光,图 3 给出了由最小分辨率为 10 pm 的光谱仪得到的 FLM 透射光谱图。由图可知, FLM 透射谱是一个周期函数,在 1547 nm 附近两个谐振谷的间距约为 32.5 nm, 消光比为 32 dB。

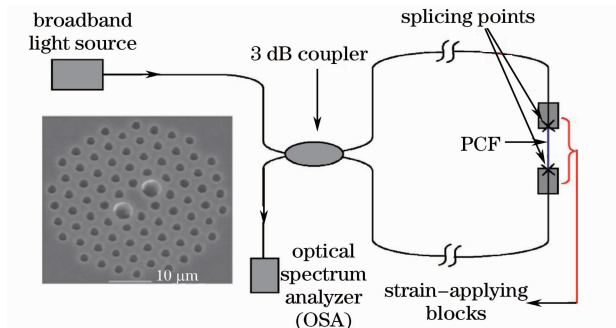


图 2 HiBi-PCF FLM 应力传感器的实验装置
(插图为 PCF 截面)

Fig. 2 Experimental setup of strain sensor based on a FLM made of a HiBi-PCF. Inset: cross section of the used PCF

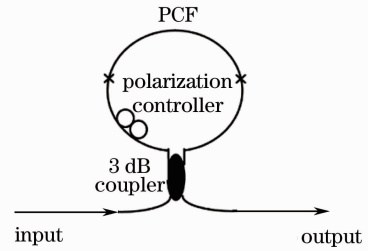


图 1 PCF FLM 的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of PCF FLM

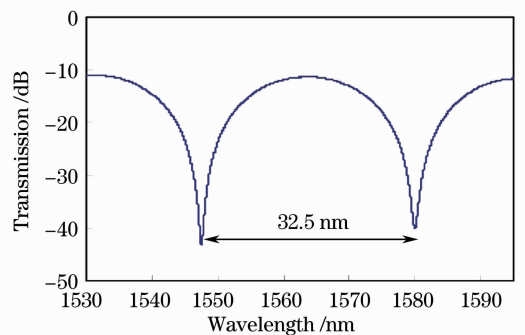


图 3 FLM 透射光谱图

Fig. 3 Transmission spectrum of the FLM

图4为不同应力作用下 HiBi-PCF FLM 的透射谱。随着轴向应力的增加,透射谱向长波方向移动。当应力从0增加到32 $\mu\epsilon$ 时,1547 nm 处谐振谷波长向长波方向偏移了7.5 nm。因此,只要监测谐振谷的波长移动,就可以获得外加应力的情况,实现应力传感。对1547 nm处谐振谷的波长随作用于 HiBi-PCF 的应力变化的关系曲线进行了拟合。波长变化与施加应力呈正比关系,并且有较好的线性度。实验数据可拟合为一次线性函数,斜率为0.23 $\text{pm}/\mu\epsilon$,拟合度 R^2 达0.9996。

温度特性实验表明其温度灵敏度仅为0.29 $\text{pm}/^\circ\text{C}$,这比传统保偏光纤(PMF)的0.99 $\text{nm}/^\circ\text{C}$ 低了3个数量级。因此,该应力传感器在温度基本恒定的普通环境中是对温度不敏感的。

为进一步降低该传感器的成本,本课题组提出了一种简单的基于强度解调的 HiBi-PCF FLM 应力传感器^[16]。如图5所示,当应力作用于 HiBi-PCF 时引起 FLM 透射谱的移动,一方面谐振谷波长发生移动,另一方面,对于透射谱上某一特定波长处,其光强也发生变化。因此,通过监测某一特定波长处 FLM 透射强度的变化,同样可以获得施加应力的信息,实现传感。为方便波长调节,选用可调谐激光器(Agilent 81689A)来提供入射光源,在实际应用中可以选用适当波长的分布反馈(DFB)激光器及光功率计(Agilent 81634A)检测 FLM 透射光强,这与基于波长检测的应力传感器相比,系统成本大大降低,实用性增强。

实验中,PCF 的长度 L 为79.5 mm,图6所示为用不同波长的激光作为输入光源时,经过 FLM 后的透射光强随应力变化的曲线。在1530 nm 波长处,当所加应力为3000 $\mu\epsilon$ 时,其灵敏度约为2.7 $\text{dB}/1000 \mu\epsilon$ 。当所用光功率计最小分辨率为0.001 dB时,应力最小分辨率为0.37 $\mu\epsilon$,比基于谐振波长测量的应力传感器的精度提高了24.6倍。

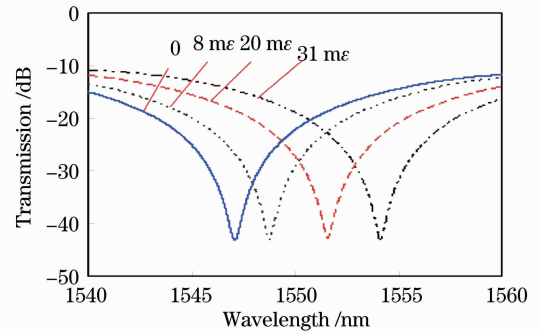


图4 不同应力作用下 HiBi-PCF FLM 的透射光谱
Fig. 4 Measured transmission spectra under different strains

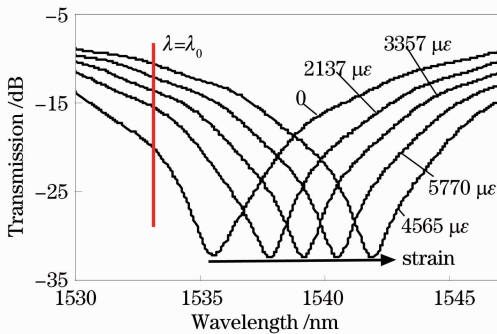


图5 不同应力作用于强度解调 HiBi-PCF FLM 传感器时的透射光谱图

Fig. 5 Experimental transmission spectra of the intensity-demodulated FLM sensor at different strains applied on the PCF

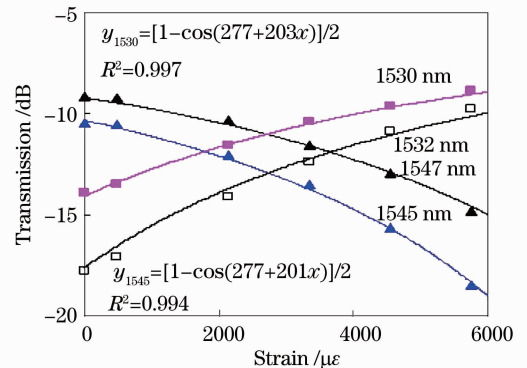


图6 不同波长的激光作为输入光源时,经过 FLM 后的透射光强随应力变化曲线

Fig. 6 Strain dependence of the transmission intensity of the FLM at different wavelengths

3.2 基于 HiBi-PCF FLM 的气压传感器

传统的光纤气压传感器为增加测量灵敏度都需要一些修正。为克服这一缺点,研究人员提出了基于 HiBi-PCF FLM 的气压传感器^[17]。

图7给出了基于 HiBi-PCF FLM 的气压传感器的实验装置和实验所用 PCF 的截面,FLM 置于一个开口金属盒内,两者同时置于一只密封的气罐内。该气罐与一台空气压缩机相连,内部气压可由压力表测量。

FLM 的输入输出端置于气罐外。

图 8 给出的是正常气压下 FLM 的透射谱。取 1551.86 nm 处的谐振谷作为测试波谷,图 9 给出了不同气压下 FLM 透射谱的变化。对 1551.86 nm 处谐振谷在不同气压下的波长变化进行线性拟合。拟合结果表明,该传感器对气压的灵敏度达到 3.42 nm/MPa,拟合度为 0.999。这与事先的理论分析吻合得很好。

对 1551.86 nm 处谐振谷波长在不同温度下的变化进行线性拟合可知,传感器对温度的灵敏度为 $-2.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,这远低于普通光纤布拉格光栅(FBG)气压传感器对温度的灵敏度,因此在温度变化不大的普通环境中该传感器对温度是不敏感的。

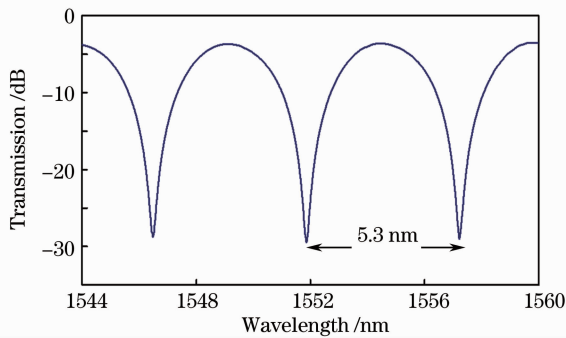


图 8 正常气压下 HiBi-PCF FLM 的透射谱

Fig. 8 Transmission spectrum of the HiBi-PCF FLM under normal pressure

3.3 基于乙醇填充的 HiBi-PCF FLM 的高灵敏度温度传感器

PCF 具有对温度不敏感的特性,上述应力和气压传感器均是利用这一特性排除温度对测量的干扰。PCF 不能直接用于温度测量,最近本课题组提出了一种基于乙醇填充 HiBi-PCF FLM 的高灵敏度温度传感器^[18]。

图 10 给出了将乙醇填充的 PCF 插入 FLM 中制作高灵敏度温度传感器的实验装置和实验所用 PCF 的截面。所用 PCF 长 6.1 cm(由长飞光纤光缆有限公司提供),当光波长为 1550 nm 时其双折射为 1.02×10^{-3} 。利用毛细效应将乙醇填充进 PCF 后,其双折射发生明显变化,这将使实验中透射谐振谷波长范围增大,从而增加温度的测量范围。PCF 两端与普通 SMF 熔接。输入光源为 200 nm 宽带光源,透射谱由分辨率为 0.1 nm 的光谱仪(OSA)检测。

乙醇填充的 PCF FLM 的透射谱对于所填充乙醇的折射率变化十分敏感。图 11 给出了乙醇折射率随温度变化的经验值和由乙醇填充的 PCF 的双折射随温度变化的理论值。由图可知,随着温度上升,乙醇折射率线性下降而乙醇填充的 PCF 的双折射线性上升。图 11 插图给出了 20°C 时两个正交偏振的模式。

图 12 给出了由乙醇填充的 PCF FLM 在室温下的透射谱,相应的由乙醇填充的 PCF 在 20°C 的双折射

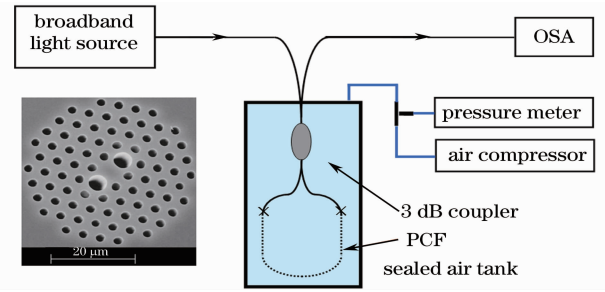


图 7 基于 HiBi-PCF FLM 的气压传感器的实验装置 (插图为所用 PCF 的截面)

Fig. 7 Experimental setup of the pressure sensor constructed with HiBi-PCF FLM. Inset: cross section of the used PCF

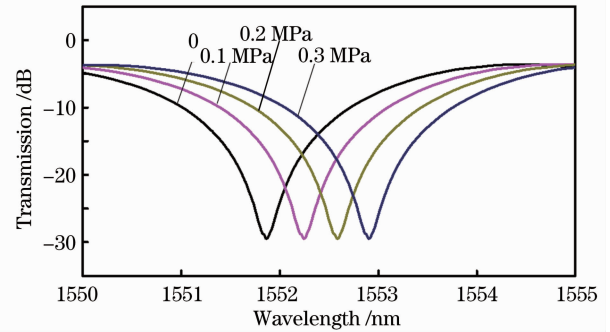


图 9 不同气压下谐振谷波长的变化

Fig. 9 Measured transmission spectra under different pressures

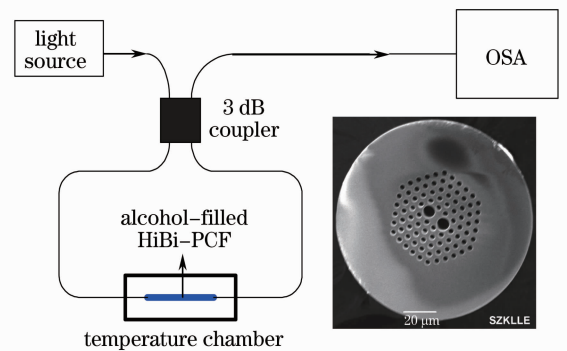


图 10 基于乙醇填充 HiBi-PCF FLM 的高灵敏度温度传感器的实验装置。插图为所用 PCF 的截面

Fig. 10 Experimental setup of the temperature sensor based on a FLM inserted with an alcohol-filled HiBi-PCF. Inset: cross section of the used PCF

约为 3.9×10^{-4} , 与理论值(约 3.5×10^{-4}) 十分接近, 其中误差是由于理论计算时 PCF 空气孔洞的几何尺寸与真实值之间的差别造成的。

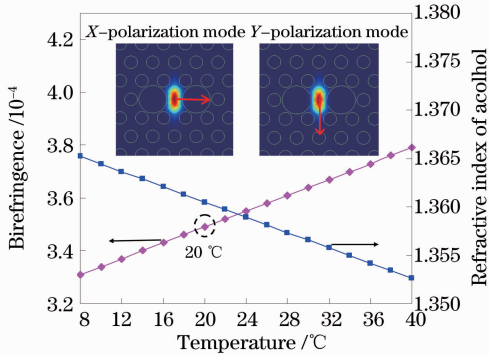


图 11 乙醇折射率随温度变化的经验值和理论上由乙醇填充的 PCF 随温度的变化。插图为 20 °C 时乙醇填充 PCF 的 X 和 Y 偏振模场

Fig. 11 Temperature dependence of the refractive index of alcohol and birefringence of the alcohol-filled PCF in theory. Insets: X and Y polarization mode fields of the alcohol-filled PCF at 20 °C

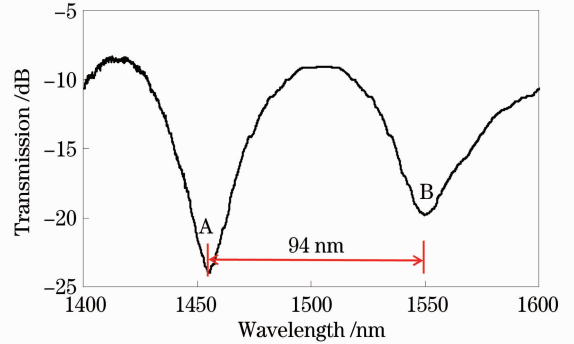


图 12 在室温下乙醇填充的 PCF FLM 的透射谱
Fig. 12 Transmission spectrum of the alcohol-filled PCF FLM at 20 °C

图 13(a), (b) 分别给出了温度由 20 °C 上升至 34 °C 和由 20 °C 下降至 8 °C 时乙醇填充的 HiBi-PCF FLM 的透射谱变化。由图可知当温度由 20 °C 逐步上升至 34 °C 时, 谐振谷 A 的波长从 1455.8 nm 上升至 1543.7 nm; 当温度由 20 °C 逐步下降至 8 °C 时, 谐振谷 B 的波长从 1549.8 nm 下降至 1470.4 nm。

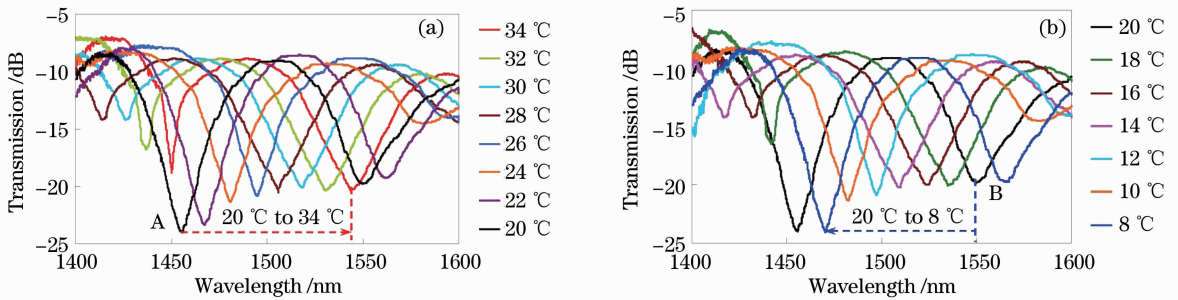


图 13 温度(a)由 20 °C 上升至 34 °C 和(b)由 20 °C 下降至 8 °C 时乙醇填充的 HiBi-PCF FLM 的透射谱变化
Fig. 13 Transmission spectra of the alcohol-filled HiBi-PCF FLM (a) when the temperature increases from 20 °C to 34 °C and (b) when the temperature decreases from 20 °C to 8 °C

图 14 给出了谐振谷 A 和谐振谷 B 的波长与温度的关系。谐振谷 A 和谐振谷 B 对于温度的灵敏度大约分别为 6.2, 6.6 nm/°C, 分别是普通 FBG(约 0.01 nm/°C) 的 660 倍和传统 HiBi FLM^[13](约 0.94 nm/°C) 的 7 倍。

3.4 基于 LoBi-PCF FLM 的应力和微弯传感器

LoBi-PCF 也可组成 FLM。参考文献[19]提出了一种基于 LoBi-PCF FLM 光纤应力传感器。该 FLM 是由 40 cm 长, 双折射为 5.8×10^{-5} (NL-1550-NEG-1, Crystal Fiber A/S) 的 PCF 组成, 其中有 14 cm 的 PCF 是应力传感单元。当所施加应力在 0~2520 $\mu\epsilon$ 之间时, 该应力传感器的灵敏度达到 0.457 pm/ $\mu\epsilon$ 。

该装置也可用于制作光纤微弯传感器^[19]。把一段

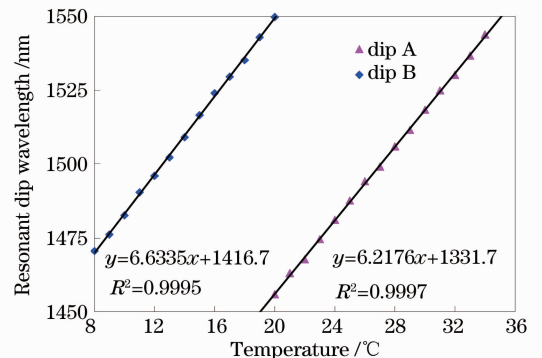


图 14 谐振谷 A 和谐振谷 B 的波长与温度的关系
Fig. 14 Relationship between temperature and resonant wavelength of dip A and dip B

约 40 cm 长的 LoBi-PCF 插入 FLM 中,其中的 15.5 cm 是传感单元。实验结果显示,透射谐振谷的波长移动与所加微弯有很好的线性关系。当所加微弯在 $0\sim 9.92\text{ m}^{-1}$ 之间时,其灵敏度达到 $0.337\text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 。

图 15 为基于 LoBi-PCF FLM 的应力和微弯传感器实验装置。图 16 给出室温下 LoBi-PCF FLM 的透射谱。由图 16 可知,在 $1400\sim 1700\text{ nm}$ 之间出现了两个谐振谷,相邻两个谐振谷的波长间距约为 110 nm 。

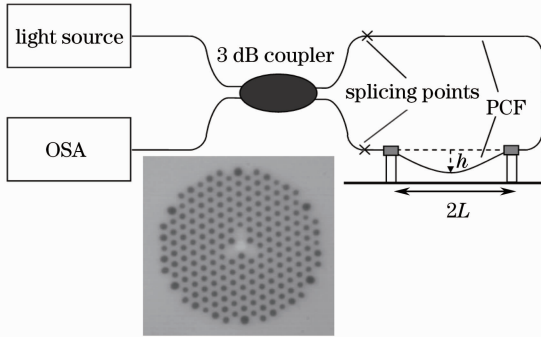


图 15 基于 LoBi-PCF FLM 的应力和微弯传感器的实验装置。插图为实验所用 PCF 截面

Fig. 15 Experimental setup of the strain and curvature measurement by using LoBi-PCF FLM. Inset: cross section of the used PCF

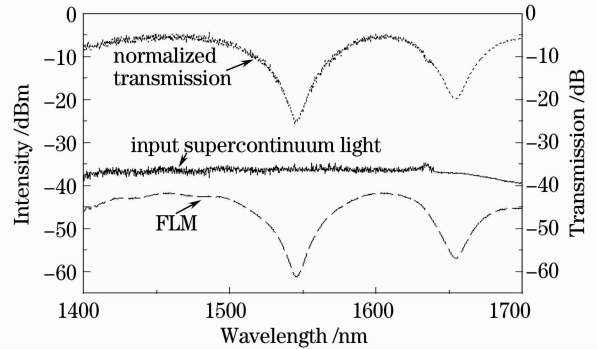


图 16 室温下 LoBi-PCF FLM 的透射谱

Fig. 16 Transmission spectra of LoBi-PCF FLM at room temperature

在微弯作用下透射谐振谷波长向短波方向移动。两者之间呈现出很好的线性关系且灵敏度达到 $-0.337\text{ nm}/\text{m}^{-1}$,当所用光谱仪最小分辨率为 0.02 nm 时,该微弯传感器的最小分辨率为 0.059 m^{-1} ,这与普通的弯曲传感器相比已经非常精确。

3.5 基于 LoBi-PCF FLM 的扭曲传感器

图 17 给出了基于 LoBi-PCF FLM 的对温度不敏感扭曲传感器的实验装置和实验所用 PCF 的截面^[21]。实验时 PCF 与一根平衡光纤结合并夹在两块金属板之间以引入必要的初始双折射,调整所加的力直到 PCF FLM 透射谱谐振谷出现在放大自发辐射(ASE)光源的波长范围($1520\sim 1620\text{ nm}$)内。

当所施加扭曲分别为顺时针(CW)和逆时针(CCW)增加时,PCF FLM 透射谱分别向短波和长波方向移动,且这种变化具有可逆性和可重复性。为得到此传感器的灵敏度,研究人员以 10° 为间隔将扭曲角度从 0° 增加到 360° 。

图 18 给出了 PCF FLM 透射谱谐振谷波长与所加扭曲角度的变化。当所加扭曲角度由 60° 增加到 140° 时,谐振谷波长相应地由 1545.2 nm 移动到了 1597.9 nm ,共移动了 52.7 nm 。其灵敏度比基于 SMF 的扭曲传感器提高了 3 倍。且计算机拟合的函数与正弦函数的拟合度 R^2 高达 0.9898 ,这说明在误差允许范围内我们就可以认为 PCF FLM 透射谱谐振谷波长与所加扭曲角度的关系就是正弦函数关系。将 $75^\circ\sim 140^\circ$ 的谐振谷波长与所加扭曲角度的关系拟合成一次函数,其拟合度为 0.9937 ,这说明两者之间有很好的线性关系。其灵敏度为 $1.00\text{ nm}/(^\circ)$ (实际应用中,可事先扭曲至 $75^\circ\sim 140^\circ$ 范围内,以获得更高的灵敏度),比基于 HiBi-PCF^[25]和侧孔保偏光纤^[26]的扭曲传感器的灵敏度分别提高了 17 倍和 12.5 倍。

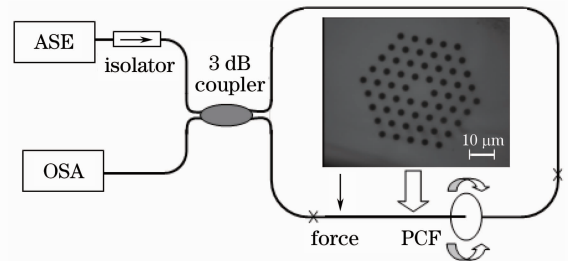


图 17 基于 LoBi-PCF FLM 的对温度不敏感扭曲传感器的实验装置。插图为实验所用 PCF 的截面

Fig. 17 Sensing scheme based on LoBi-PCF for twist measurement. Inset: cross section of the used PCF

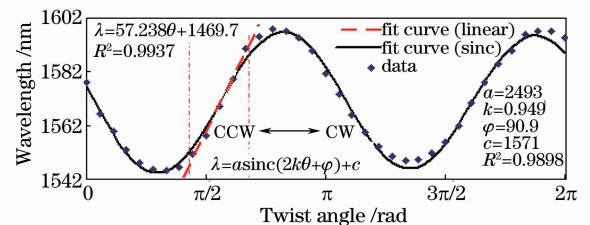


图 18 PCF FLM 透射谱谐振谷波长随所加扭曲角度的变化

Fig. 18 Dip wavelength changing with the twist angle

比基于 HiBi-PCF^[25]和侧孔保偏光纤^[26]的扭曲传感器的灵敏度分别提高了 17 倍和 12.5 倍。

4 结束语

对国内外已报道的基于 PCF FLM 的光纤传感器进行了综述,总结了多种基于 PCF FLM 的光纤传感器,包括应力、温度、微弯、扭曲和气压传感器。

PCF 具有较好的温度稳定性,在传感检测中可有效排除多个被测物理量之间的交叉影响,使传感器结构简化,因此 PCF FLM 已经在很多传感领域得到应用。对于目前需求较大的用于高温环境的传感器件,基于 PCF FLM 的传感器也将具有较大应用潜力。然而实际应用是复杂而多变的,基于 PCF FLM 的光纤传感器的发展现状还无法满足实际需求,还有许多研究课题需要开展,主要包括:1)传感器进一步实用化的研究,提高传感器的稳定性,并开展基于现有科技水平的应用研究;2)研究多个传感器的复用和解调技术,提高其性价比。这些将成为基于 PCF FLM 的光纤传感器进一步发展的动力。

参 考 文 献

- 1 P. Kaiser, H.-W Astle. Low loss single material fibers made from pure fused silica [J]. *Bell Syst. Technol.*, 1974, **53**(6): 1021~1039
- 2 T.-A. Birks, J.-C. Knight, P. S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 3 A.-V. Husakou, J. Hermann. Supercontinuum generation, four wave mixing, and fission of higher order solitons in photonic crystal fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2171~2182
- 4 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814
刘博文, 胡明列, 宋有建 等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 811~814
- 5 Li Honglei, Lou Shuqin, Guo Tieying *et al.*. Low loss fusion splicing of germanium doped core photonic crystal fiber and standard single mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1589~1593
李宏雷, 娄淑琴, 郭铁英 等. 掺锗芯光子晶体光纤和普通单模光纤的低损耗熔接 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1589~1593
- 6 C.-L. Zhao, Z.-H. Li, X.-F. Yang *et al.*. Effect of a nonlinear photonic crystal fiber on the noise characterization of a distributed Raman amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 561~563
- 7 Zhao Chunliu. Optical fiber sensors based on long period gratings in photonic crystal fibers [J]. *J. Optoelectronics • Lasers*, 2011, **22**(1): 9~12
赵春柳. 基于光子晶体光纤长周期光栅的传感器研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2011, **22**(1): 9~12
- 8 Tao Zaihong, Chang Jianhua, Wu Xuhua. Discrete optical Raman amplifier based on photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 50~53
陶在红, 常建华, 武旭华. 基于光子晶体光纤的分立式拉曼放大器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 50~53
- 9 Yu Xianlun, Zhao Wwiwei, Cheng Wei. Research of high-pressure photonic crystal fibers sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2057~2063
余先伦, 赵威威, 程 伟. 高压光子晶体光纤传感器系统的研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2057~2063
- 10 C.-L. Zhao, X.-F. Yang, C. Lu *et al.*. Temperature insensitive interferometer using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2535~2537
- 11 X.-F. Yang, C.-L. Zhao, Q.-Z. Peng *et al.*. FBG sensor interrogation with high temperature insensitivity by using a HiBi-PCF Sagnac loop filter [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(1-3): 63~68
- 12 S.-P. Li, K.-S. Chiang, W.-A. Gambling. Gain flattening of an erbium-doped fiber amplifier using a high-birefringence fiber loop mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9): 942~944
- 13 Y.-G. Liu, B. Liu, X.-H. Feng *et al.*. High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12): 2382~2390
- 14 L.-B. Yuan, W. Jin, L.-M Zhou *et al.*. Enhancement of multiplexing capability of low-coherence interferometric fiber sensor array by use of a loop topology [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1313~1319
- 15 X.-Y. Dong, H.-Y. Tam, P. Shum. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(15): 151113
- 16 Qian Wenwen, Zhao Chunliu, Dong Xinyong *et al.*. Intensity measurement of a temperature insensitive strain sensor based on a highly birefringent photonic crystal fiber loop [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(9): 1273~1279

- 钱文文, 赵春柳, 董新永 等. 基于强度检测的 HiBi-PCF-FLM 温度不敏感应力传感器[J]. 光电子·激光, 2010, **21**(9): 1273~1279
- 17 H.-Y. Fu, H.-Y. Tam, L.-Y. Shao *et al.*. Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(15): 2835~2839
- 18 W.-W. Qian, C.-L. Zhao, S.-L. He *et al.*. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1548~1550
- 19 H.-P. Gong, C.-C. Chan, L.-H. Chen *et al.*. Strain sensor realized by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac loop [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(16): 1238~1240
- 20 H.-P. Gong, C.-C. Chan, P. Zu *et al.*. Curvature measurement by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac loop [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(16): 3142~3144
- 21 P. Zu, C.-C. Chan, Y.-X. Jin *et al.*. A temperature-insensitive twist sensor by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac interferometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(13): 920~922
- 22 V. Vali, R.-W. Shorthill. Fiber ring interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(5): 1099~1103
- 23 D. B. Mortimore. Fiber loop reflectors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1217~1224
- 24 X. Fang, R.-O. Claus. Polarization-independent all-fiber wavelength division multiplexer based on a Sagnac interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2146~2148
- 25 H.-M. Kim, T.-H. Kim, B. Kim *et al.*. Temperature-insensitive torsion sensor with enhanced sensitivity by use of a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(20): 1539~1541
- 26 O. Frazao, S.-O. Silva, J.-M. Baptista *et al.*. Simultaneous measurement of multiparameters using a Sagnac interferometer with polarization maintaining side-hole fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4841~4848