

# 基于强度检测的 HiBi-PCF-FLM 温度不敏应力传感器<sup>\* \*</sup>

钱文文, 赵春柳<sup>\* \*</sup>, 董新永, 张在宣, 金尚忠  
(中国计量学院 光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 提出一种基于强度检测的高双折射光子晶体光纤环镜(HiBi-PCF-FLM, highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror)温度不敏应力传感器。利用 PCF 对温度的不敏感性, 把一小段 HiBi-PCF 传感光纤插入到 FLM 中, 可实现温度不敏应力传感。利用应力作用引起 FLM 透射光谱移动的特性, 由 DFB 激光作为入射光源, 使用光功率计检测经过 FLM 后的透射光强度, 实现基于强度检测的应力传感。当输入波长为 1547 nm 时, 作用于 PCF 应力与经过 FLM 后透射光强度的关系可拟合为二次函数, 其与实验数据的拟合度高达 0.9995。

**关键词:** 高双折射光子晶体光纤(HiBi-PCF); 光纤环镜(FLM); 强度检测; 应力传感器

**中图分类号:** TN25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2010)09-1273-03

## Intensity measurement of a temperature insensitive strain sensor based on a highly birefringent photonic crystal fiber loop

QIAN Wen wen, ZHAO Chun liu<sup>\* \*</sup>, DONG Xing yong, ZHANG Zai xuan, JIN Shang zhong  
(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** An intensity measurement of a temperature insensitive strain sensor is proposed based on a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror(HiBi-PCF-FLM). The strain sensor is realized by using a short length of highly birefringent photonic crystal fiber(PCF) as the sensing element inserted in a fiber loop mirror(FLM). Due to the ultralow thermal sensitivity of the PCF, the proposed strain sensor is inherently insensitive to temperature. When a DFB laser as a light source passes through the FLM, the output power is affected by the transmission spectral change of the FLM which is only caused by the strain applied on the PCF. Based on intensity measurement, an optical power meter is adequate to deduce the strain information and an expensive optical spectrum analyzer(OSA) is not needed. Experimental results show that the relationship between the applied strain and the output intensity is approximately quadratic polynomial for strains from 0 to 5770  $\mu\epsilon$  when the DFB laser is at a wavelength of 1547 nm, and the fitting degree of the relationship curve is obtained highly as 0.9995.

**Key words:** highly birefringent photonic crystal fiber(HiBi-PCF); fiber loop mirror(FLM); intensity measurement; strain sensor

## 1 引言

光纤环镜(FLM)广泛应用于光纤通信与传感系统中。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。通常, 在 FLM 中插入一段高双折射(HiBi, highly birefringent)。光纤构成 HiBi-FLM 其具有偏振无关性、高消光比和抗外界环境干扰等优良特性。由于应力作用改变 HiBi-FLM 光程差, 所以 HiBi-FLM 可以实现应力传感。同时, 由于一般 HiBi 光纤纤芯与包层的热膨胀系数差别较大, 环境温度对光纤的双折射影响较

大; 温度变化也可以改变 HiBi-FLM 光程差, 因此 HiBi-FLM 也可用于温度检测。但是, 当基于 HiBi-FLM 的传感器用于检测应力和压力变化时, 对温度的交叉敏感影响了对待测量的检测。

光子晶体光纤(PCF)是一种新型光纤, 通过改变纤芯和包层空气孔位置引起结构不对称, 可以制作出 HiBi-PCF<sup>[4,5]</sup>。其双折射差可达  $10^{-3}$ , 远远高于传统的 HiBi 光纤。由于 PCF 由纯石英构成, 所以 PCF 对温度不敏感。利用 HiBi-PCF 对温度的不敏感性, 已实现了多种基于 HiBi-PCF-FLM 的应力和压力传感器<sup>[6,7]</sup>, 但都是通过使用宽带光源和光谱仪检测谐振波峰

\* 收稿日期: 2009-12-10 修订日期: 2010-04-02

\* 基金项目: 国家“973”计划资助项目(2010CB327804)

\*\* E-mail: zhchunliu@hotmail.com

(谷)的波长变化来实现对应力等待测量的传感。

本文提出一种基于强度检测的 HiBi-PCF-FLM 温度不敏感应力传感器,使用 DFB 激光作为输入光源,利用光功率计检测经过 FLM 后的透射光强度,实现了传感器的强度检测。

### 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。FLM 由 3 dB 耦合器、HiBi-PCF 和偏振控制器(PC)构成。FLM 基本原理为入射光由 3 dB 耦合器分为两个反向传输的光信号,两束光经过 HiBi-PCF 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,即表现为梳状滤波的特性。PC 用于调整两束光的偏振状态。

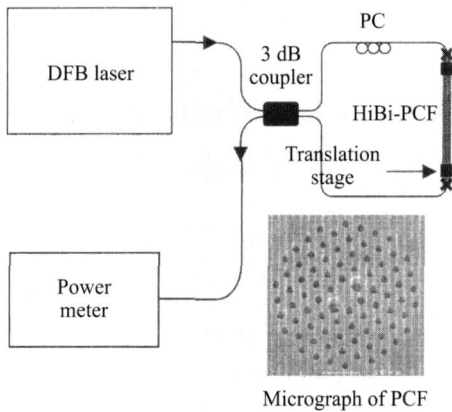


图 1 HiBi-PCF FLM 温度不敏感应力传感器的实验

Fig. 1 Experimental setup of the temperature insensitive strain sensor based on a HiBi-PCF FLM

HiBi-PCF 截面如图 1 所示,其大小孔直径分别为 3.6 和 3.1 μm,在波长为 1550 nm 时折射率差 Δn 为 8.65 × 10<sup>-4</sup>。HiBi-PCF 长度为 82.8 mm。HiBi-PCF 两端与普通单模光纤(SMF)熔接,所使用熔接机型号为 Erisson FSU975。由于 PCF 与 SMF 的模式场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 8 dB。

### 3 实验及结果

#### 3.1 特性分析

由宽带光源作为入射光,由分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(Yokogawa 735301)得到的 FLM 透射光谱图如图 2 所示。由图可知,FLM 透射谱是一周期性函数。两个波峰(波谷)间距离约为 36.5 nm,消光比为 26 dB。

实验中,HiBi-PCF 作为传感单元。当轴向应力作用于 HiBi-PCF 时,由于轴向应力引起的拉伸及弹光效应,导致 HiBi-PCF 的长度和折射率差发生变化。因为 FLM 中两反向传输光束的相位差  $\theta = 2\pi LB/\lambda$  所以应力作用导致相位差发生变化,并最终引起 FLM 透射光谱的移动。此外,由于 HiBi-PCF 对温度的不敏感,外界环境温度变化并不影响 FLM 透射光谱。

图 3 为不同应力作用下 HiBi-PCF-FLM 的透射光谱。随着轴向应力增加,透射谱向长波方向移动。当应力从 0 至 5770 με 变化时,1535.5 nm 处谐振谷波长向长波方向偏移了 6.5 nm。因此,当监测谐振峰(谷)的波长移动时,可以获得外加应力的情况,实现应力传感。图 4 给出了 1535.5 nm 处谐振谷的波长随作用于 HiBi-PCF 的应力变化的关系曲线。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

$$y = 0.0011x + 1535.5 \quad (1)$$

拟合度 R<sup>2</sup> 高达 0.999。基于波长检测原理,此 HiBi-PCF-FLM 应力传感器的灵敏度为 0.0011 nm/με。

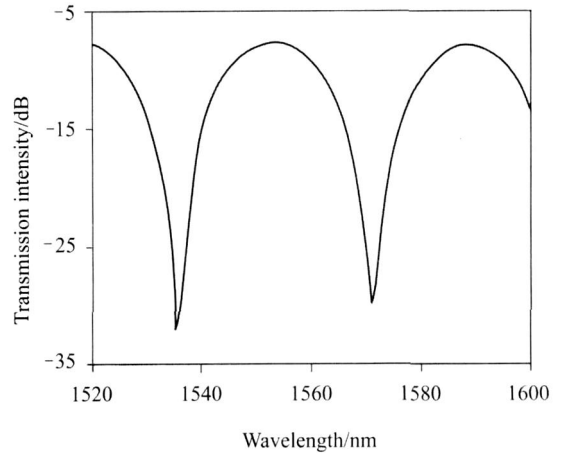


图 2 HiBi-PCF FLM 的透射光谱图

Fig. 2 The transmission spectrum of the HiBi-PCF FLM

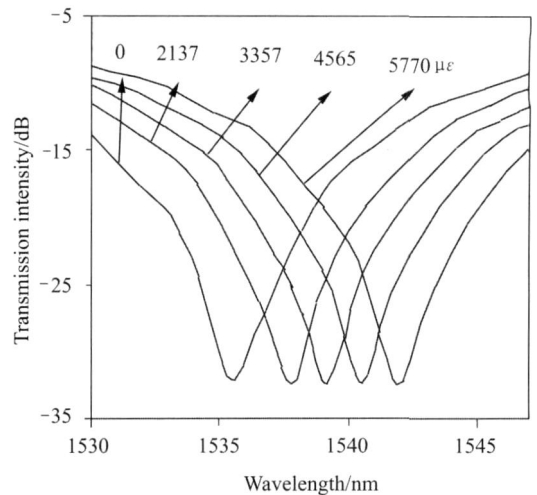


图 3 不同应力作用于 HiBi-PMF FLM 的透射光谱图

Fig. 3 The transmission spectrum for the HiBi-PMF FLM at different strain applied on the HiBi-PCF

#### 3.2 基于强度检测的结果

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,当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。

实验中, 鉴于调节波长方便, 使用可调谐激光器 (Agilent 81689 A) 来提供入射光源, 在实际应用中可以使用适当波长的 DFB 激光器。同时, 使用光功率计 (Agilent 81634 A) 检测 FLM 透射光强。基于强度检测的传感方案使用 DFB 激光器代替宽带光源, 光功率计代替光谱仪, 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。

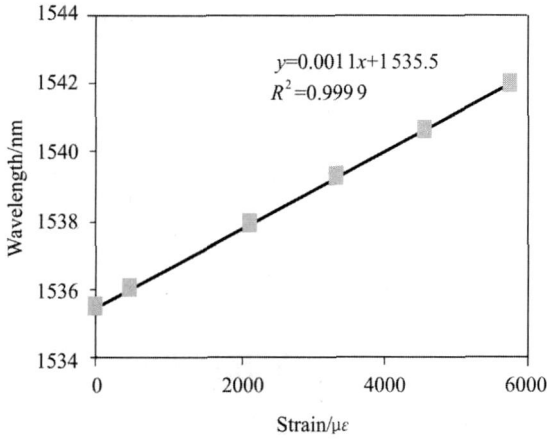


图 4 在 1535.5 nm 处谐振谷波长随作用于 HiBi PCF 应力变化的关系曲线

Fig. 4 The variation of the transmission dip wavelengths near 1535.5 nm with strain for the HiBi PMF FLM

图 5 给出了在不同波长的激光作为入射光时 HiBi PCF 所受应力与经过 FLM 后的透射光强间的关系曲线。由图 5 可知, 入射光源的波长对传感器特性有较大影响。当波长小于谐振波长 (1535.5 nm) 的激光作为入射光源时, 随着作用于 HiBi PCF 的应力增大, 经过 FLM 后的输出光强增大, 同时灵敏度减小。相反地, 当波长大于谐振波长 (1535.5 nm) 的激光作为入射光源时, 随着作用于 HiBi PCF 的应力增大, 经过 FLM 后的输出光强减小, 同时灵敏度增大。

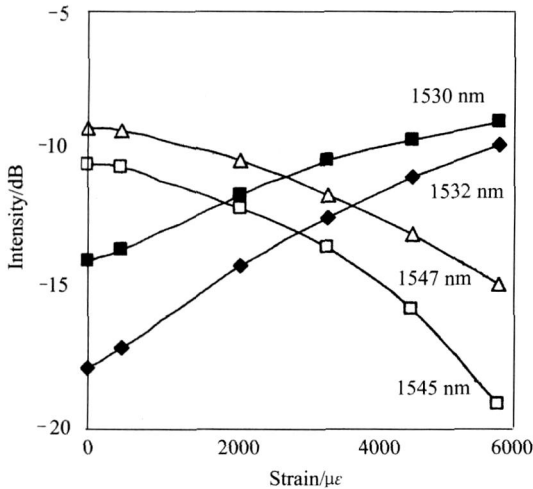


图 5 在不同波长的激光作为输入光源时, 经过 FLM 后的透射光强与应力变化曲线

Fig. 5 Strain dependence of the transmission intensity of the FLM at different wavelengths

图 6 表示输入波长为 1547 nm 时作用于 HiBi PCF 应力与经过 FLM 后透射光强的关系曲线。由图 6 可知, 当应力由 0 到 5770 με 变化时, 输出光强变化与应力变化可拟合为二次函数

$$y = -1E - 0.7x^2 - 0.0003x - 9.126 \quad (2)$$

式 (2) 与实验数据的拟合度达 0.9995。尽管应力与光强的关系是相对复杂的二次函数, 但是利用现有的软件功能处理非常简便, 并不影响实际应用效果。

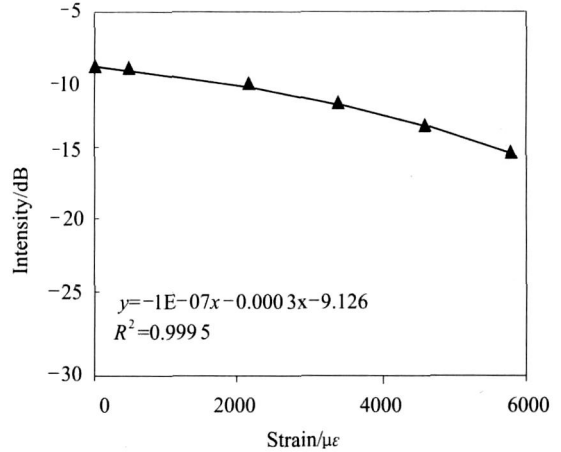


图 6 当入射光源波长为 1547 nm 时, 经过 FLM 后的透射光强与应力变化曲线

Fig. 6 Strain dependence of the transmission intensity of the FLM at the wavelength 1547 nm

## 4 结论

HiBi PCF FLM 已用于温度不敏感应力和压力传感。利用 DFB 激光器和光功率计, 通过检测输出光强随传感头所受应力的变化来实现传感功能, 这种基于强度检测的传感器具有很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] Mortimore D B. Fiber loop reflectors [J]. Lightwave Technol, 1988, 6(7): 1217-1224.
  - [2] Zhao C L, Yang X, Lu C, et al. Temperature-insensitive interferometer using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(11): 2535-2537.
  - [3] Liu Y, Liu B, Feng X, et al. High birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors [J]. Appl Opt, 2005, 44(12): 2382-2390.
  - [4] Wang L W, Ma X R, Cao Y, et al. A novel method of measuring the birefringence temperature characteristics of high birefringence fiber [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(10): 1372-1374.
- 王力维, 马秀荣, 曹晔, 等. 高双折射光纤双折射温度特性新型测量方法研究 [J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(10): 1372-1374.

(下转第 1279 页)

- [4] LI Xi-hua, GE Lu-quan, JIN Ning, et al. LiNbO<sub>3</sub> based asymmetrical electrode 1 × 2 Y-branch digital optical switch [ J ]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(2): 168-170.  
李锡华, 葛陆泉, 金宁, 等. 基于 LiNbO<sub>3</sub> 非对称电极 1 × 2 Y 分叉数字光开关 [ J ]. 光电子 • 激光, 2009, 20(2): 168-170.
- [5] JIANG Xiao-qing, QI Wei, ZHANG Hao, et al. Low crosstalk 1/√2 times/2 thermo-optic digital optical switch with integrated S-bend attenuator [ J ]. Photonics Technology Letters, 2006, 18(4): 610-612.
- [6] HU Guo-hua, YUN Bin-feng, JI Yang, et al. Low crosstalk polymeric switch with asymmetric mach-zehnder interference structure [ J ]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(12): 1952-1954.  
胡国华, 恽斌峰, 嵇阳, 等. 非对称马赫-曾德尔干涉型低串扰聚合物光开关 [ J ]. 光电子 • 激光, 2009, 20(12): 1952-1954.
- [7] Cahill L W. The synthesis of generalised Mach-Zehnder optical switches based on multimode interference couplers [ J ]. Opt. and Quantum Electron, 2003, 35(4): 465-473.
- [8] Karellos G T, Petrantonakis D, Tsiokos D. All-optical 3R burst-mode reception at 40 Gb/s using four integrated MZI switches [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(1): 184-192.
- [9] WANG Fan, YANG Jian-yi, CHEN Li-mei, et al. Optical Switch Based on Multimode Interference Coupler [ J ]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(2): 421-423.
- [10] LIU En-ke, ZHU Bing-sheng, LUO Jin-sheng, et al. Semiconductor Physics [ M ]. Xi'an: Jiaotong University Press, 1998.  
刘恩科, 朱秉生, 罗晋生, 等. 半导体物理学 [ M ]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [11] Bryngdahl O. Image formation using self-imaging techniques [ J ]. J Opt Soc Amer, 1973, 63(4): 416-419.
- [12] Weber J P. Optimization of the carrier-induced effective index change in InGaAsP waveguides-application to tunable Bragg filters [ J ]. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(8): 1801-1816.

作者简介:

马琼芳 (1981-), 女, 博士研究生, 主要从事光通信系统及器件的研究。

(上接第 1275 页)

- [5] ZHAO Hong-xia, DING Zhi-qun, WANG Jin-xia, et al. A higher sensitivity concentration sensor using long period fiber grating [ J ]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(6): 742-744.  
赵洪霞, 丁志群, 王金霞, 等. 一种基于 LPFG 高灵敏度浓度传感器 [ J ]. 光电子 • 激光, 2009, 20(6): 742-744.
- [6] Kaiser P, Astle H W. Low loss single material fibers made from pure fused silica [ J ]. Bell Syst Technol, 1974, 53(10): 1021-1039.
- [7] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [ J ]. Opt. Lett., 1997, 22(13): 961-963.
- [8] LOU Shu-qin, JIAN Wai, REN Guo-bin, et al. A Novel high birefringence photonic crystal fiber [ J ]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2005, 16(11): 1265-1269.
- 娄淑琴, 简伟, 任国斌, 等. 一种新结构的高双折射光子晶体光纤 [ J ]. 光电子 • 激光, 2005, 16(11): 1265-1269.
- [9] Dong X, Tam H Y, Shum P. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer [ J ]. Appl Physics Lett, 2007, 90(15): 151113.
- [10] Fu H Y, Tam H Y, Shao L Y. Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer [ J ]. Applied Optics, 2008, 47(15): 2835-2839.

作者简介:

赵春柳 (1973-) 女, 特聘教授, 博士后, 主要从事光电子与光通信技术光纤传感技术, 光子晶体光纤器件及应用的研究。