

基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统

康泽新 孙 将 马 林 齐艳辉 简水生

北京交通大学光波技术研究所,全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044

摘要 提出了一种基于耦合型双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力双参数解耦测量的全光纤型传感系统。实验制备了一系列不同长度的双芯光纤滤波器,并测量分析了其自由光谱范围与双芯光纤长度的关系,结果与理论基本一致。实验发现双芯光纤及布拉格光栅对施加应力与环境温度的变化具有不同的光谱响应。利用光谱分析仪实时监测双芯光纤透射光谱波谷处波长及光纤光栅透射谱的波长漂移量,方便地实现了温度与应力的解耦双测量。多次测试发现该传感器对应力与温度响应特性具有良好的重复性,波长误差低于实验所用光谱仪分辨率。对于0.01 nm波长分辨率的光谱仪,提出的全光纤型传感器可以分别实现4.3048 $\mu\epsilon$ 及0.4562 $^{\circ}\text{C}$ 的应力与温度传感测量分辨率。

关键词 光纤光学;双芯光纤;全光纤传感器;解耦测量;交叉敏感;光纤布拉格光栅

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0506004

Decoupling Dual Measurement Sensor System of Temperature and Strain Based on Twin-Core Fiber Cascaded with Fiber Bragg Grating

Kang Zexin Sun Jiang Ma Lin Qi Yanhui Jian Shuisheng

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education,
Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A novel all-fiber sensing configuration for decoupling measurement of temperature and strain based on the twin core fiber (TCF) with an in-line embedded fiber Bragg grating (FBG) is proposed. A series of TCF filters with different lengths are fabricated experimentally, and the relationship between the free spectral range (FSR) and the fiber length of these filters is measured and analyzed, which are in agreement with the theory. It is found during the experiment that the TCF and FBG have different spectral responses for the changing strain and temperature. Optical spectrum analyzer (OSA) is used to monitor the wavelength at the bottom of the TCF transmitted spectrum and the wavelength drift of the fiber grating transmitted spectrum. The sensor tested has favorable repeatability for the responses of strain and temperature, and has a lower wavelength error compared with the spectrometer used in experiment. Withing a spectrometer having a wavelength distinguishability of 0.01 nm, the proposed all-fiber sensor can reach a distinguishability of 4.3048 $\mu\epsilon$ for stress and 0.4562 $^{\circ}\text{C}$ for temperature.

Key words fiber optics; twin core fiber; all-fiber sensor; decoupling measurement; cross sensitivity; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.2300

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2015-01-12

基金项目: 国家973项目(2010CB328206)

作者简介: 康泽新(1986—),男,博士研究生,主要从事基于半导体环形激光器的光电集成器件、光通信、光传感等方面的研究。E-mail: newism@hotmail.com

导师简介: 简水生(1929—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感及全光网络方面的研究。E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

1 引 言

耦合型双芯光纤(TCF)是一种基于两个平行光纤波导间功率耦合效应的特殊光纤,由于两芯模式之间互相耦合,光场在TCF传输过程中,会产生此消彼长的功率交替现象。这种耦合过程不仅与TCF长度有关,而且与波长相关。将一段一定长度的TCF熔接植入到一段普通单模光纤(SMF)中间,且保证TCF两端任一纤芯与SMF纤芯对齐,以实现低插入损耗及高消光比,由此构成基于耦合型TCF的梳状滤波器。这种光纤梳状滤波器由于本身具有结构紧凑简单、波长可调、稳定性高等优势,自从1980年Schiffner提出来之后就得到了国内外研究人员的足够重视。Murakami等^[1]于1981年分析了耦合型TCF的弯曲响应特性。北京交通大学的Feng等^[2-3]对TCF的温度、应力特性进行了大量的分析研究,实验中所测的温度与应力灵敏度分别为 $0.037 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 及 $0.866 \text{ pm}/\mu\text{e}$ 。2010年,江微微等^[4-5]实验研制了基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器,随后利用 CO_2 激光器实现了对双芯光纤梳状滤波器输出光谱的调节。在传感领域,TCF也引起了很多研究者的广泛关注。2011年,Peng等^[6]提出了一种利用TCF实现加速度的传感测量系统;Yin等^[7]利用TCF实现了高灵敏度的曲率测量。同时,TCF可以用来解调光纤光栅。2011年,厦门大学Zou等^[8]利用TCF对布拉格光栅(FBG)的温度、应力、扭转特性进行了解调,其工作原理就是基于TCF的滤波特性,实时监测不同参量值下FBG反射功率的变化情况。但是所有基于TCF的光纤传感系统,如轴向应力、位移、弯曲、流速、加速度传感等都存在着较大的温度交叉敏感问题,也就是说当所测量参量(如轴向应力)与温度同时变化时会导致测量误差急剧增加,很难分辨TCF透射波长的漂移是由温度还是应力引起的,仅 1°C 的变化就会导致 10 pm 波长的漂移(大约与几十 μe 变化导致的漂移量相当),这远远背离了光纤传感系统高测量精度的要求。

光纤光栅作为一种反射或透射式滤波器,其应用较为广泛。自从1989年Morey等对光纤光栅的温度和应变传感响应特性进行了研究之后,基于光纤光栅的全光纤型传感器由于自身具有抗电磁干扰、高灵敏度、耐腐蚀、便于实现分布式组网等优势在传感领域的潜在应用引起了世界各国有关学者的广泛关注和极大兴趣。其应用领域也不断拓展,研究人员现已将其逐步应用于多种物理量的测量,制成了各种类型的传感器。另外利用FBG的不同参量都可以实现传感解调,比如基于波长漂移的温度压力传感^[9-11],基于 3 dB 带宽变化的微位移测量^[12-13]以及基于FBG反射功率变化的温度、应力传感^[8]等。同利用TCF滤波器实现物理参量测量的光纤传感系统一样,基于FBG的光纤传感系统也面临着所测量参量与温度交叉敏感的问题。但是TCF与FBG对温度及应力的响应特性不同,这样就提供了一种利用TCF和FBG来实现温度与应力的解耦传感测量的思路。

本文提出了一种全光纤型基于耦合型TCF级联FBG的温度与应力双参数解耦的全光纤传感系统。由于TCF与FBG对温度与应力的响应特性不同,通过光谱分析仪(OSA)实时监测TCF透射光谱波谷处波长及FBG透射光谱的波长漂移量就可以很容易地对由温度与应力引起的波长漂移进行解耦。测量精度或传感分辨率与OSA的分辨率有关,当光谱仪分辨率为 0.01 nm 时,提出的全光纤型传感器可以分别实现 $4.3048 \mu\text{e}$ 及 0.4562°C 的应力与温度测量分辨率。

2 实验结构与步骤

首先制作TCF型滤波器,图1为耦合型双芯光纤滤波器的结构示意图,将一段长度为 L 的双芯光纤熔接植入到一段普通单模光纤与一段光敏单模光纤之间即可制成耦合型TCF滤波器,其中熔接处需要将双芯光纤中一个纤芯与单模光纤的纤芯对准,尽量减少插入损耗。然后,在光敏单模光纤中写入FBG。实验中所使用的单模光纤来自于CORNING公司的SMF-28e,纤芯和包层半径分别为 $4.1 \mu\text{m}$ 和 $62.5 \mu\text{m}$;实验室自制双芯光纤的纤芯和包层半径分别为 $3.28 \mu\text{m}$ 和 $65 \mu\text{m}$,双芯间距为 $14.6 \mu\text{m}$ 。

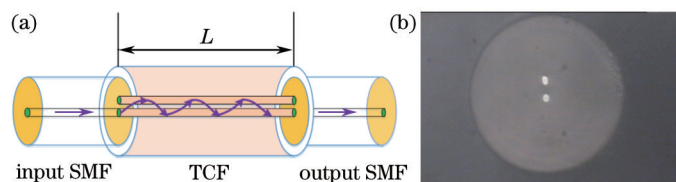


图1 (a) 双芯光纤熔接植入单模光纤结构示意图; (b) 实验所用双芯光纤截面示意图

Fig.1 (a) Schematic illustration of TCF based sensor embedded in SMFs; (b) microscopic cross section image of the TCF

实验中用的FBG是用相位掩模技术及紫外扫描侧向曝光技术在TCF后衔接的普通单模光敏光纤中写入的。使用的均匀相位掩模板光栅周期是1068 nm,对应FBG的中心透射波长为1545.919 nm。紫外光源由一台商用的输出波长为248 nm的KrF准分子激光器(COHERENT COMPexPro 110 F)、光衰减器和248 nm全反镜所构成。其中,248 nm紫外光源的参数为:脉冲频率20 Hz,脉冲持续时间20 ns,脉冲能量80 mJ,光斑宽度约为10 mm。需要注意的是,1) 为了改善光纤的紫外光敏性,在进行紫外写入FBG之前,应先对光敏单模光纤进行氢载;2) 为了提高TCF滤波器及FBG的长期稳定性,在FBG写入之后对其进行退火处理。图2为提出的光纤传感器的典型透射输出光谱,其中周期性的干涉条纹是TCF的梳状滤波器输出谱,而尖锐的透射峰是由于FBG的频率选择性造成的。在实验中,采用图中1530 nm附近的标识波谷R来记录TCF对外界环境变化的动态响应特性,也就是波谷波长漂移量。

由于耦合型TCF的两芯之间存在着功率互耦合作用,这种基于耦合型TCF的光纤传感器的输出功率与耦合系数及TCF长度有关。另外,TCF的长度以及双芯的折射率失谐共同决定了TCF输出谱的自由光谱范围(FSR)。实验中制作了一系列不同长度的TCF滤波器,并且选取1550 nm附近两个透射波峰为参考点,测量计算了不同长度时的FSR值。图3给出了FSR与TCF长度的关系曲线,从中可以看出,自由光谱范围的大小与双芯光纤的长度成反比,与理论结果^[4]符合。利用这一特性可以很方便地通过调节TCF的长度来获得具有不同FSR的双芯滤波器。

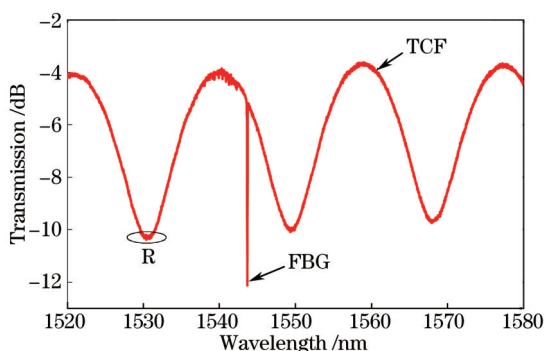


图2 双芯光纤级联FBG的典型传输透射谱

Fig.2 Typical transmission spectrum of the proposed sensor

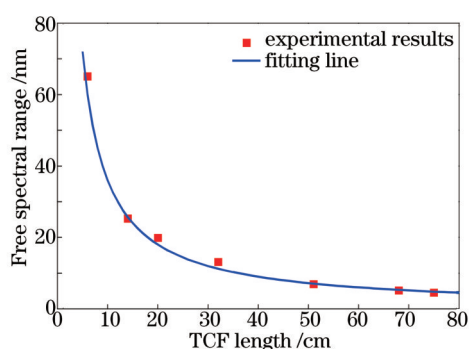


图3 TCF的FSR随着TCF长度的变化关系曲线

Fig.3 Free spectral range as a function of the TCF length

3 实验结果与讨论

3.1 测试传感器的应力响应特性

测试传感器应力响应系统的实验结构如图4所示,整个传感系统由宽谱光源(BBS, KOHERAS, superK uersa)、传感器、应力测试平台以及光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA, AQ6375)组成。实验时,将光纤传感器置于应力测试平台上,一端的单模光纤固定在保持不动的光纤夹具上,而另一端的单模光纤固定在一个可移动平台上。通过调节可移动平台来精确控制所施加应力的大小。利用一台波长范围为600~1800 nm的超连续激光光源作为宽谱输出光源,其最大输出强度为-30 dBm;利用光谱分析仪实时监测传感器的透射输出光谱,其波长分辨率为0.05 nm。

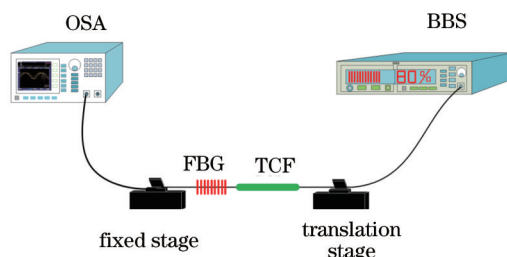


图4 应力测试实验结构示意图

Fig.4 Schematic representation of the strain-tested experimental set-up

实验中两光纤夹具之间的长度为 40 cm,每次操作移动平台将光纤拉伸 0.2 mm,相当于每次施加 500 $\mu\epsilon$ 的应力。图 5 给出了传感器在恒定室温 24 $^{\circ}\text{C}$ 时,分别施加不同应力作用下的透射光谱响应曲线,应力变化范围为 0~4000 $\mu\epsilon$ 。从图中可以看出,随着施加在传感器上应力的增加,TCF 传输透射谱波峰/波谷向短波长方向移动,这主要是由掺锗纤芯的弹光系数大于纯石英材料包层的弹光系数造成的。随着应力的增加,包层和纤芯的折射率都降低,但是掺锗纤芯弹光系数较大,导致纤芯折射率的减小量大于包层折射率的减小量,从而使得芯包之间的相对折射率差减小,进而使得两芯之间的互耦合系数增加,因此峰值波长向着短波长方向移动;轴向应力的增加导致双芯光纤长度略微增加,腔长的增加导致传输光谱“蓝移”。另外,从图 5 中可以发现 FBG 的透射谱出现“红移”,也就是向着长波长方向漂移,这主要是由于施加应力之后 FBG 的光栅周期增加导致其透射波长向长波长漂移。经过多次测试发现该传感器的应力响应特性具有良好的重复性。图 6 给出了在施加应力变化情况下,TCF 透射谱中波长 1300 nm 附近波谷以及 FBG 透射波长随着应力的变化关系曲线。由图 6 可见,TCF 与 FBG 对应力的透射光谱感应灵敏度分别为 0.98867 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 和 1.25 $\text{pm}/\mu\epsilon$ 。所施应力与波长漂移量之间具有良好的线性关系,其相关系数平方 R^2 分别为 0.9967 和 0.9999。

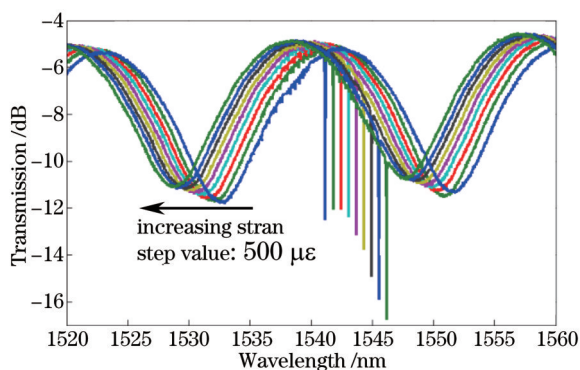


图 5 TCF 及 FBG 对施加应力的光谱响应

Fig.5 Spectral response of TCF and FBG to the loaded strain

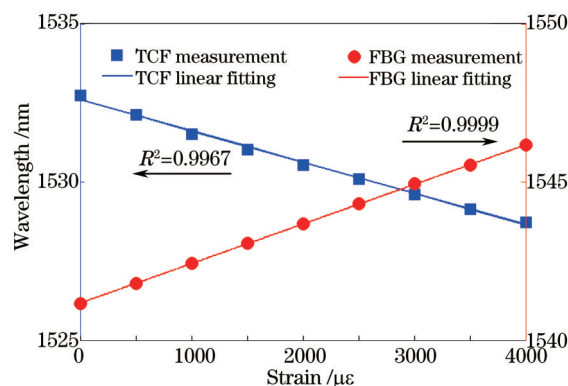


图 6 TCF 及 FBG 透射谱中谐振波长的漂移量随着施加应力的变化关系

Fig.6 Resonant wavelengths shifts of the transmission spectra in TCF and FBG as a function of strain

3.2 对传感器进行温度响应测试

将传感器粘贴在玻璃板上(其与光纤具有相近的热光系数),然后放入温控箱内,图 7 给出了传感器的在不施加应力时,分别在不同温度作用下的透射光谱响应曲线,温度变化范围为 20 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ 。从图中可以看出,随着温度的增加,TCF 与 FBG 的透射光谱都出现一定的“红移”,即向长波长方向移动。对于 TCF 来说,这是由于随着温度的升高,纤芯和包层折射率都相应地增大,而掺锗石英纤芯的热光系数大于纯石英包层的,因此纤芯的折射率增加量大于包层的折射率增加量,从而使得纤芯与包层之间的相对折射率差出现一定程度的增加,进而使得两芯之间的互耦合系数减少,因此透射光谱出现红移的现象。对于 FBG,温度的升高会导致 FBG 光栅周期的增加,从而使得 FBG 透射峰随着温度的增加向长波长方向移动。经过多次测试发现该器件的温度响应特性具有良好的重复性。图 8 给出了不同温度作用下,TCF 透射谱中波长在 1300 nm 附近的波谷以及 FBG 透射波长随着温度变化的关系曲线。从图中可以发现,TCF 与 FBG 的温度灵敏度分别为 31.25 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 10.125 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 。温度变化与波长漂移量之间也具有良好的线性关系,其相关系数平方 R^2 分别为 0.9993 和 0.9999。

当温度与应力同时施加作用到传感器时,TCF 和 FBG 透射光谱的波长漂移可以用下面的传输矩阵给出:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{TCF}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon,\text{TCF}} & K_{T,\text{TCF}} \\ K_{\epsilon,\text{FBG}} & K_{T,\text{FBG}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda_{\text{TCF}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 分别表示 TCF 与 FBG 透射谱的波长漂移量。矩阵元素 $K_{T,\text{TCF}}$ 和 $K_{T,\text{FBG}}$ 分别表示 TCF 与 FBG 对温度的感应系数; $K_{\epsilon,\text{TCF}}$ 和 $K_{\epsilon,\text{FBG}}$ 分别表示 TCF 与 FBG 对轴向应力的感应系数,即应力与温度的改变量。

通过矩阵运算,可以得到实际温度与应力的改变量为

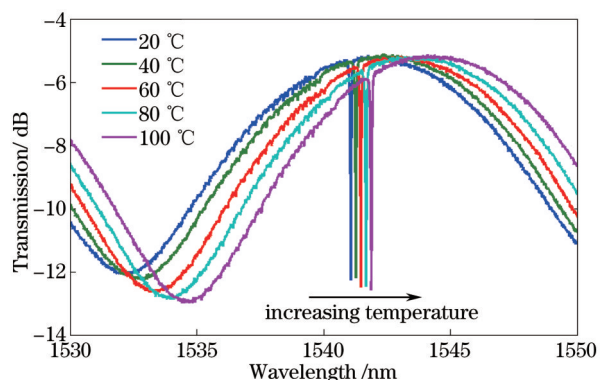


图 7 TCF 及 FBG 随着环境温度变化的光谱响应

Fig.7 Spectral response of the up-taper based TCF and FBG to temperature

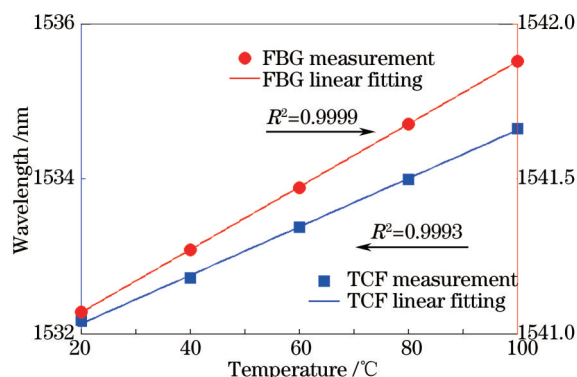


图 8 TCF 及 FBG 透射谱中谐振波长的漂移量随着环境温度的变化关系

Fig.8 Resonant wavelengths shifts of the transmission spectra in TCF and FBG as a function of temperature

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} K_{T,FBG} & -K_{T,TCF} \\ -K_{\varepsilon,FBG} & K_{\varepsilon,TCF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{TCF} \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $M = K_{\varepsilon,TCF} K_{T,FBG} - K_{T,TCF} K_{\varepsilon,FBG} = -49.073$, 表示(2)式中系数矩阵的行列式值。将实验结果代入(2)式,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = -\frac{1}{49.073} \begin{bmatrix} 10.125 & -31.25 \\ -1.25 & -0.989 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{MZI} \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

通过(3)式,利用光谱分析仪实时监测 TCF 和 FBG 透射光谱的移动情况,就可以同时解耦出现场温度与应力的具体改变量。提出的传感器分辨率主要受光谱分析仪最小波长分辨率的影响。对于波长分辨率为 0.01 nm 的光谱仪来讲,提出的基于耦合型 TCF 级联 FBG 的全光纤型传感器可以提供的温度与应力分辨率分别为 0.4562 °C 和 4.305 $\mu\varepsilon$ 。

4 结 论

提出了一种新颖的基于耦合型 TCF 级联 FBG 的温度与应力双参数同时测量的全光纤传感系统。由于 TCF 与 FBG 对温度与应力的响应特性不同,通过光谱仪 OSA 实时监测传感器透射光谱的波长漂移量就可以方便地对施加应力与环境温度进行解耦测量,有效地解决了测量过程中温度交叉敏感的问题。另外,该传感器是基于纤芯之间的模式耦合作用,因此传感器对外界折射率或湿度的变化不敏感,避免了测量过程中环境折射率或湿度变化带来的测量误差。实验结果表明,TCF 与 FBG 的应力灵敏度分别为 0.98867 $\text{pm}/\mu\varepsilon$ 和 1.25 $\text{pm}/\mu\varepsilon$;温度灵敏度分别为 31.25 $\text{pm}/\text{°C}$ 和 10.125 $\text{pm}/\text{°C}$ 。经过计算发现,所提出的传感器在光谱仪波长分辨率为 0.01 nm 的情况下,可以实现的温度与应力分辨率分别为 0.4562 °C 和 4.305 $\mu\varepsilon$ 。由于提出的传感器具有结构简单、制作简易、良好的线性响应、高灵敏度以及高重复性等优势,因此可以预测这种基于耦合型 TCF 级联 FBG 的温度与应力解耦传感系统具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Murakami Y, Sudo S. Coupling characteristics measurements between curved waveguides using a two-core fiber coupler[J]. Appl Opt, 1981, 20(3): 417-422.
 - 2 Suchun Feng, Honglei Li, Ou Xu, *et al.*. Compact in-fiber Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber[C]. SPIE, 2009, 7630: 76301R.
 - 3 Zhao Ruifeng, Pei Li, Li Zhuoxuan, *et al.*. Experimental research of temperature sensor based on twin-core fiber[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(6): 062801.
 - 4 Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Fan Linyong, *et al.*. Comb-filter based on twin-core fiber coupler[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0505001.
- 江微微, 赵瑞峰, 范林勇, 等. 基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505001.

- 5 Jiang Weiwei, Fan Linyong, Zhao Ruifeng, *et al.*. Comb-filter based on two core fiber coupler and its CO₂ laser trimming[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 044214.
江微微, 范林勇, 赵瑞峰, 等. 基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器及其 CO₂ 激光调节[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 044214.
- 6 Peng Feng, Yang Jun, Li Xingliang, *et al.*. In-fiber integrated accelerometer[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(11): 2056 - 2058.
- 7 Yin Guolu, Lou Shuqin, Lu Wenliang, *et al.*. A high-sensitive fiber curvature sensor using twin core fiber-based filter[J]. *Appl Phys B*, 2014, 115(1): 99-104.
- 8 Yi Zou, Xiaopeng Dong, Ganbin Lin, *et al.*. Wide range FBG displacement sensor based on twin-core fiber filter[J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2012, 30(3): 337-343.
- 9 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun, *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 89-91.
张 颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 89-91.
- 10 Dragan Coric, Marco Lai, John Botsis, *et al.*. Distributed strain measurements using fiber Bragg gratings in small-diameter optical fiber and low-coherence reflectometry[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26484-26491.
- 11 Fan Liuqing, Ma Li, Han Daofu, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensor based on dynamic Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 39(10): 1005003.
范刘静, 马 力, 韩道福, 等. 基于动态法布里-珀罗腔的光纤光栅温度传感[J]. *中国激光*, 2013, 39(10): 1005003.
- 12 Changyu Shen, Chuan Zhong. Novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 170(1): 51-54.
- 13 Ng Jun Hong, Zhou Xiaoqun, Yang Xiufeng, *et al.*. A simple temperature-insensitive fiber Bragg grating displacement sensor[J]. *Opt Commun*, 2007, 273(2): 398-401.
- 14 Fan Linyong, Zhao Ruifeng, Jiang Weiwei, *et al.*. M-Z interferometer using a twin-core fiber for strain sensing[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(10): 1488-1491.
范林勇, 赵瑞峰, 江微微, 等. 用于应力传感的双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10): 1488-1491.

栏目编辑: 王晓琰