

doi:10.3788/gzxb20154404.0406005

# 单模与多模光纤级联型压力传感器

付兴虎, 谢海洋, 王柳柳, 付广伟, 毕卫红

(燕山大学 信息科学与工程学院 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:**研制了一种基于单模光纤与多模光纤级联结构的马赫-曾德尔干涉型压力传感器,它通过将一段单模光纤夹熔在两段多模光纤之间制成.利用纤芯的不匹配所激发的单模光纤中纤芯模和包层模之间的干涉,使外界压力的变化直接作用于单模光纤内部光场,获得较高灵敏度.当传感器总长度为 39 mm 时,可获得较为理想的传输谱线.压力传感实验表明:随着压力的增大,传输光谱向长波方向漂移,在 2~16N 的压力范围内,传感器的压力灵敏度为 554.830 pm/N,线性度为 0.984,具有结构简单、易于制造、成本较低、灵敏度高等优点,可用于不同领域的压力传感.

**关键词:**单模光纤;多模光纤;马赫-曾德尔干涉仪;级联型;压力

**中图分类号:**TN274

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2015)04-0406005-5

## Pressure Sensor Based on Cascading Single Mode Fiber with Multimode Fiber

FU Xing-hu, XIE Hai-yang, WANG Liu-liu, FU Guang-wei, BI Wei-hong

(The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Heibei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** A novel Mach-Zehnder interferometer pressure sensor was proposed by cascading single mode fiber with multimode fiber. It was fabricated by just splicing a single mode fiber with two short section of multimode fibers. The core-cladding modes interference of the single mode fiber was obtained due to the core mismatch, which made the change of outside pressure more directly acted on the light field inside of the single mode fiber, so a high pressure sensitivity can be achieved. In order to obtain a well-defined interference pattern, the length of the sensor was defined as 39 mm after many experiments. The experimental results show that with the increasing of the pressure, the transmission spectrum of the sensor appears red shift phenomenon obviously, the pressure sensitivity of the sensor is 554.830 pm/N and the linearity is 0.984 in the range of 2~16N pressure changes. The sensor has advantages such as simple structure, easy manufacturing, low cost, high sensitivity and so on, it can be well applied to pressure sensing field.

**Key words:** Single mode fiber; Multimode fiber; Mach-Zehnder interferometer; Cascading; Pressure

**OCIS Codes:** 060.2370; 060.2340; 060.2310

## 0 引言

近年来,光纤应力传感技术发展迅速,已成功地应用于生产生活的诸多领域,如航空航天<sup>[1]</sup>、建筑工程结构<sup>[2]</sup>、生物医学<sup>[3]</sup>等.随着各领域需求的不断扩大,需要制备性能更优、结构更简单新颖的光纤压力传感器.

因此,国内外对基于不同结构的光纤压力传感器进行了深入的研究,如基于光纤光栅<sup>[4-6]</sup>、保偏光纤<sup>[7]</sup>、锥形光纤<sup>[8]</sup>、法布里-珀罗干涉仪<sup>[9-10]</sup>、萨格纳克干涉仪<sup>[11-12]</sup>、光后向散射技术<sup>[13]</sup>等.这些光纤应力传感器在各自特定的应用领域都具有一定的优势,但就性能与成本的均衡而言却稍显不足.因此,亟需研究出一种集

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61205068, 61475133)、河北省科技计划项目(Nos. 13273305, 12963550D)、河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(No. BJ2014057)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划和燕山大学信息学院优秀青年基金(No. 2014201)资助

**第一作者:**付兴虎(1981—),男,讲师,博士,主要研究方向为特种光纤传感技术. Email: fuxinghu@ysu.edu.cn

**通讯作者:**毕卫红(1960—),女,教授,博士,主要研究方向为光纤传感与光电检测技术. Email: whbi@ysu.edu.cn

**收稿日期:**2014-11-20; **录用日期:**2015-03-04

<http://www.photon.ac.cn>

制备简单、成本低廉、性能良好于一身的光纤应力传感器。

本文提出了一种基于多模光纤-单模光纤-多模光纤 (Multimode fiber-Single mode fiber-Multimode fiber, MSM) 结构的马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, M-Z) 干涉型应力传感器。该传感器仅需将一段单模光纤夹熔在两段较短的多模光纤 (Multimode fiber, MMF) 之间便可制成, 制作简单、成本低廉。该传感器利用单模光纤 (Single Mode fiber, SMF) 中包层模与纤芯模之间的干涉, 使得外界环境能够更加直接地作用于光纤内部的光场, 从而能获得较高的灵敏度。

## 1 理论分析

基于 MSM 结构的 M-Z 干涉型应力传感器的结构原理如图 1。该传感器的结构是由一段去除涂覆层的 SMF 夹熔在两段较短的渐变型 MMF 之间构成。实验中使用的 SMF 为 SMF-28e 阶跃型单模光纤, 其纤芯与包层直径分别为  $9\ \mu\text{m}$  和  $125\ \mu\text{m}$ , 折射率分别为 1.458 和 1.454, MMF 纤芯和包层直径分别为  $62.5\ \mu\text{m}$  和  $125\ \mu\text{m}$ 。

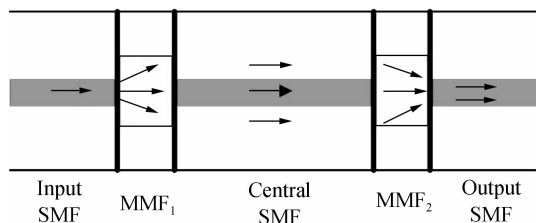


图 1 基于 MSM 结构的压力传感器的结构原理

Fig. 1 The schematic diagram of MSM fiber structure

如图 1, 宽带光源的光经输入端 SMF 进入 MMF<sub>1</sub> 后, 激励起 MMF<sub>1</sub> 中各阶模式, 引起光场的重新分布, 在经过 MMF<sub>1</sub> 和中间段 SMF 的分界面时, 由于纤芯的不匹配, 一部分光将沿 SMF 纤芯以纤芯模式传输, 而另一部分光则耦合进 SMF 的包层中以包层模式传输。这一过程中, SMF 中的纤芯模和包层模的传播常量不同, 二者之间必然存在一个光程差。因此, 当两模式经中间段 SMF 并进入 MMF<sub>2</sub> 后将发生干涉, 最终由输出端 SMF 输出, 从而通过光谱仪可以观察到对比度明显且清晰的类余弦型传输光谱。MMF<sub>1</sub> 和 MMF<sub>2</sub> 分别发挥了模式的激发与模式耦合的作用; 中间段 SMF 则主要起干涉臂的作用。因此, 在分析基于 MSM 结构的压力传感器时, 采用了有效折射率简化干涉模型<sup>[14-15]</sup>, 主要原因为: 不同光纤模式在传感器中具有不同的传输路径, 也必然存在光程差差异, 当两个不同的光纤模式再次相遇时便会产生干涉。由此可知, 干涉条纹由两个模式的光程差决定。当传感器接入长度不变时, 两个模式的光程差与其有效折射率之差呈正比关系, 从而能利用有效折射率简化二者之间的干涉模型。

在中间段 SMF 的各阶包层模式中, 总有一个包层模式的功率最大即处于主导地位。处于主导地位的第  $m$  阶包层模与纤芯基模发生干涉, 产生干涉光谱, 处于次要地位的包层模与纤芯基模的干涉只是对干涉光谱起调制作用。因此, 可以采用双光束干涉进行近似分析, 干涉光强及  $m$  阶波峰的中心波长表示为

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}}^m + 2\sqrt{I_{\text{core}}I_{\text{clad}}^m} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}^m l}{\lambda}\right) \quad (1)$$

$$\lambda_m = \frac{2\pi l}{(2m+1)\pi} = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}^m L}{2m+1} \quad (2)$$

式中  $I$  为输出总光强;  $I_{\text{core}}$ 、 $I_{\text{clad}}^m$  分别为纤芯模和起主导地位的第  $m$  阶包层模的光强;  $l = \Delta n_{\text{eff}}^m L$  为两模式经中间段 SMF 传输后所产生的光程差;  $L$  为中间段 SMF 的接入长度;  $\Delta n_{\text{eff}}^m$  为两模式之间的有效折射率之差。由式(1)和(2)可得两模式之间的相位延迟  $\varphi^m$  及 2 个相邻的干涉波峰之间的波长间隔分别为

$$\varphi^m = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}^m L}{\lambda} = \frac{2\pi(n_{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad},m})L}{\lambda} \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{4\Delta n_{\text{eff}}^m L}{(2m+1)(2m+3)} \approx \frac{\lambda_m^2}{\Delta n_{\text{eff}}^m L} \quad (4)$$

式中  $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{clad},m}$  分别为纤芯基模与第  $m$  阶包层模的有效折射率,  $\lambda$  为自由空间光波长。

由式(3)和(4)可知, SMF 的长度  $L$  的改变会直接影响传输光谱的自由谱范围与条纹对比度。因此, 为获得对比度明显且易于观察的传输光谱, 中间段 SMF 的接入长度应该适中。与此类似, 两段 MMF 的接入长度也会影响该传感器的性能和特性。为了使两个 MMF 中可能存在的高阶模式之间的干涉具有较大的自由谱范围, 使其干涉产生的波峰或波谷不落入实验中波长的测量范围之内, 两段 MMF 的长度应该越短越好, 此时由其所引起的光程差可以忽略不计<sup>[16]</sup>。经过反复实验验证, 中间段 SMF 的长度及两段 MMF 的长度分别为 35 mm 和 2 mm 时最合适, 此时获得的传输光谱如图 2。

图 2 中, 所获得的传输光谱干涉条纹可见度明显, 没有出现杂乱的小尖峰, 说明在该传感器结构中, 只有很少的光纤模式参与了干涉, 在可测波长范围内所形成的波峰波谷数量合适, 且具有较低的传输损耗。主要是因为两段多模光纤的主要作用是模式的激发与耦合, 目的是通过模场的不匹配更好地激发中间段 SMF 中的包层模式并使包层模式与纤芯模式发生干涉, 而中间段 SMF 作为干涉臂使用。虽然渐变型 MMF 具有多个模式的传输能力, 但是并不代表其用于制备传感器便能将所有的模式都激发出来。事实上, 由渐变型 MMF 与 SMF 所组成的 MSM 结构即使在不考虑熔接损耗和传输损耗的情况下, MMF 中能激发的模式数量与种类也是极有限的。一般而言, 在本文所采用的光源范围 1520~1610nm 内, LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub>、LP<sub>03</sub>、LP<sub>04</sub> 模式为

该结构渐变型 MMF 中所能激发的四种主要模式<sup>[17]</sup>, 四者的能量约占 MMF 中总能量的 98%, 其中的 LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub> 模式则占四者总能量的 90% 以上. 因此, 在本文所提出的传感器结构中, 可以近似认为仅激发了 MMF 的这四种模式. 为了简化模型分析, 只考虑 LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub> 两种模式, 换言之, 文中的 MSM 结构可以滤掉一些复杂的高阶模式, 而只激发光纤的基模和几个低阶包层模.

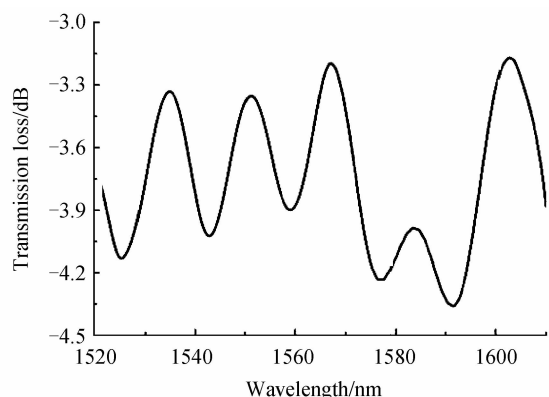


图 2 选定光纤长度的传感器所对应的传输光谱  
Fig. 2 Transmission spectrum of the sensor with certain length

为了更好地分析该传输光谱所对应的各模式的能量分布情况, 将图 2 中的光谱谱线进行快速傅里叶变换. 快速傅里叶变换方法是一种较为普遍的光纤光谱分析方法, LIU De-ming 等<sup>[18]</sup> 利用该方法分析了全光纤马赫-曾德尔干涉仪的空间频谱. 它对传输光谱采用快速傅里叶变换以获得相应的空间频谱, 通过简单计算获得群模式折射率差与空间频率值之间的关系, 能够直观体现光纤传感器中各模式的能量分布情况, 且空间频率值越大, 对应的模式越高阶. 因此, 基于该方法得到的空间频谱如图 3.

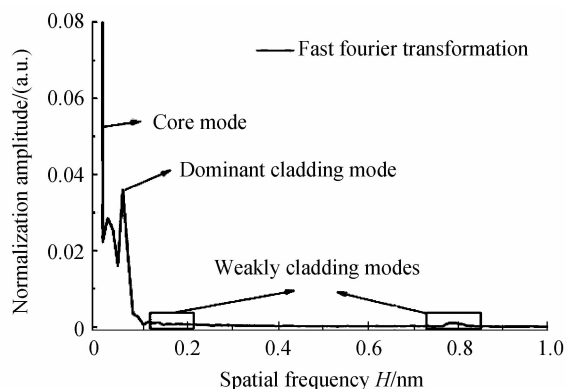


图 3 传输光谱的空间频谱  
Fig. 3 Spatial frequency of the transmission spectrum

从图 3 中可以看出, 干涉光谱的空间频谱中含有不同的频率成分, 且低频信号能量居多, 高频信号能量十分微小. 即基模能量最强, 而众多包层模式中有一个包层模能量最高即起主导作用, 其所对应的空间频谱

值  $\xi=0.0563 \text{ \# /nm}$ . 与基模和起主导作用的包层模相比, 其他包层模式能量分布极小, 与基模及其相互之间的干涉对传输谱线的影响也十分微弱, 可以忽略不计. 因此, 传输光谱的空间频谱从另一角度说明了采用所提出的 MSM 结构的传感器传输光谱中主要是光纤基模和低阶包层模产生了干涉.

将该 MSM 结构的 M-Z 干涉型传感器应用于压力测量, 当作用于传感器径向上的力发生变化时, 传感器自身会发生十分轻微的变化, 即微应变. 由于弹光效应的作用, 微应变会引发光纤中纤芯和包层的有效折射率相应的变化. 因此, 在纤芯中传输的纤芯模式和在包层中传输的包层模式之间的光程差也将随之发生改变, 从而引起传感器透射谱波长的漂移. 由式(2)可知, 外界压力改变引起的波长漂移量可表示为

$$\Delta\lambda_m = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}}^m + \Delta n)L}{2m+1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1} = \frac{2\Delta nL}{2m+1} \quad (5)$$

式中  $\Delta\lambda_m$  为第  $m$  阶干涉条纹中心波长漂移量,  $\Delta n$  为 SMF 纤芯模有效折射率和包层模有效折射率差值的变化量. 因此, 外界压力的变化直接地作用于 SMF 内部的光场, 从而有效提高了传感器的灵敏度.

## 2 实验与结果分析

理论上, 传感器中间段 SMF 的接入长度越长, 在可观察的波长范围内因干涉所形成的峰值点越多. 但 SMF 的长度过长, 往往伴随着传输光谱峰值点密度过大及传输损耗过大等问题的产生, 增加解调的难度. 因此, 实验中需接入一适宜长度的 SMF, 由之前的分析可知, MMF 的长度越短越好. 经过大量实验, 选定中间段 SMF 的长度及两段 MMF 的长度分别为 35 mm 和 2 mm, 即整个传感器的长度仅为 39 mm, 此时, 仅有两个低阶的包层模式具有较高的能量, 即能与纤芯模式发生干涉, 从而成功排除了高阶模式干涉的影响, 所获得的传输光谱干涉条纹较明显, 条纹间隔相对较宽且具有较低的传输损耗.

为了验证所提出的 MSM 结构光纤传感器的应力传感特性, 搭建了如图 4 的压力实验系统. 实验中选用的熔接机是 FITELE S178 型光纤熔接机; 光源为上海飞秒光电技术有限公司生产的 ASE3700 型宽带光源, 波长范围为 1 520~1 610 nm; 光学光谱分析仪 (Optical

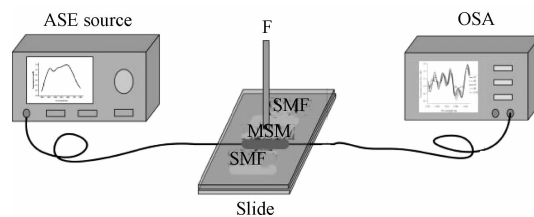


图 4 压力传感实验系统装置  
Fig. 4 Pressure experimental setup

Spectrum Analyzer, OSA)是由日本横河 YOKOGAWA 生产的 AQ6317C 型光谱仪,分辨率为 0.02 nm.

图 4 中,首先将制备好的传感器笔直固定在一个石英载玻片上,以排除弯曲的交叉影响,再在其上方粘贴一块相同的石英载玻片,通过在载玻片上添加砝码的方式来实现传感器垂直直径力的改变.为使传感器受力方向始终保持径向垂直向下,避免添加砝码后上方载玻片不水平影响压力测量的准确性,截取两段去除涂覆层且与传感器长度一致的 SMF,将其等距放置于传感器的左右两侧并分别与两载玻片粘牢固定.此时,基于 MSM 结构的传感器所受到的垂直直径压力仅为载玻片上添加的砝码重力的三分之一.实验中,砝码添加的质量范围为 600~4 800 g,每递增 600 g 记录一次传输光谱,对应的作用于传感器径向的压力变动范围为 2~16N.实验过程都在恒温 25℃ 环境中进行,排除温度的交叉敏感问题.图 5 为不同压力下所对应的传输光谱.

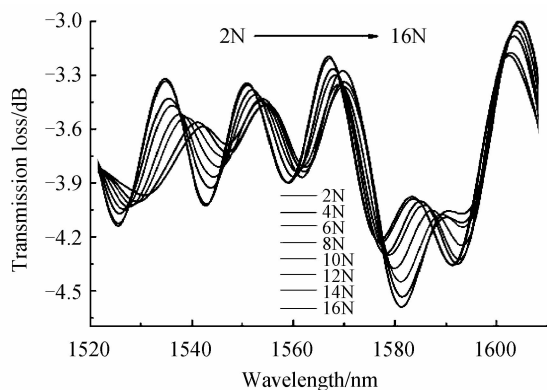


图 5 不同压力所对应的传输光谱

Fig. 5 Relationship between spectrum and pressure

由图 5 可见,随着传感器径向压力的增大,传输光谱发生明显的红移现象.为了进一步考察其变化细节,取波长 1583nm 附近的波峰作为观察点,得到该观察点中心波长随压力变化的情况如图 6.

由图 6 可知,随着垂直直径压力的不断变大,传输光谱向长波方向移动.多次重复实验,并进行数据拟合可得观测点中心波长漂移量与垂直直径压力之间的关系,如图 7.

从图 7 中可以看出,所提出的压力传感器对压力的变化十分敏感,且其中心波长的漂移与压力的变化有较好的线性关系.整个实验过程中,作用于传感器上的压力变化范围为 2~16N,测得的传输光谱在 1 583 nm 附近处波峰随压力的变化而产生的总漂移量为 7.159 nm,经拟合,该传感器的压力灵敏度为 554.830 pm/N,线性度  $R^2$  为 0.984.

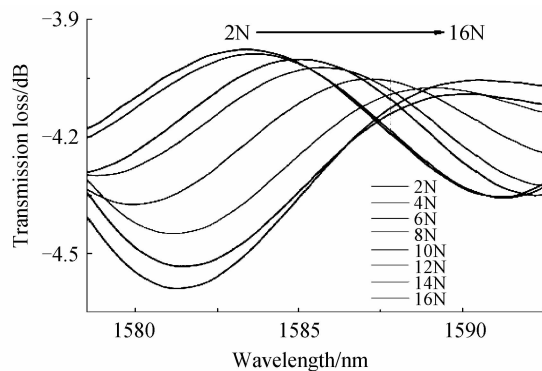


图 6 不同压力所对应的中心波长的漂移情况

Fig. 6 Shift of center wavelength corresponding to pressure

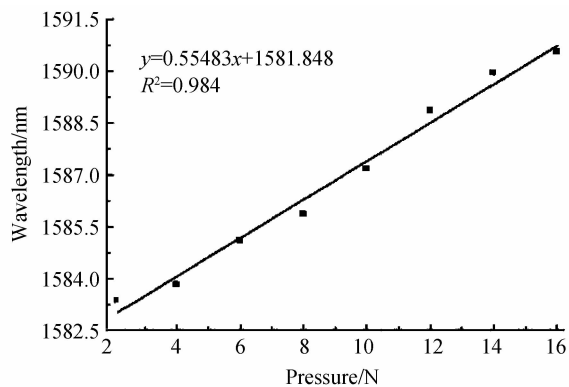


图 7 波长漂移与压力之间的关系

Fig. 7 Relationship between the wavelength shift and pressure

### 3 结论

本文提出了一种基于 MSM 结构的 M-Z 干涉型光纤压力传感器,它是将一段长为 35 mm 且已去除涂覆层的 SMF 夹熔在两段长为 2 mm 的 MMF 之间制成的.分析了传感器的传感机理,并搭建系统进行了压力传感实验.实验结果表明,随着压力的增大,其传输光谱中心波长向长波长方向漂移,在 2~16N 的压力变动范围内,其曲率灵敏度为 554.830 nm/N,且具有较好的线性度.该传感器具有体积小、重量轻、易于制备、灵敏度高等优点,能较好地应用于压力测量.

#### 参考文献

- [1] GAIZKA D, MARLENE K, MICHAEL L, *et al.* Use of a novel fiber optical strain sensor for monitoring the vertical deflection of an aircraft Flap[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(10): 1219-1225.
- [2] MOKHTAR M R, OWENS K, KWASNY J, *et al.* Fiber-optic strain sensor system with temperature compensation for arch bridge condition monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(5): 1470-1476.
- [3] CHAVKO M, KOLLER W A, PRUSACZYK K W, *et al.* Measurement of blast wave by a miniature fiber optic pressure transducer in the rat brain[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2007, **159**(2): 277-281.

- [4] LAN Yu-wen, LIU Bo, LUO Jian-hua. 3-Dimensional Strain Sensor in Fiber Bragg Grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 656-659.  
兰玉文, 刘波, 罗建华. 光纤光栅三维应力传感器的设计与实现[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 656-659.
- [5] LIU Qin-peng, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* FBG sensor for stress based on double cantilever beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1645-1647.  
刘钦朋, 乔学光, 贾振安, 等. 双悬臂梁光纤 Bragg 光栅应力传感器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1645-1647.
- [6] XIE Jian-feng, WANG Ying, MO Zhao, *et al.* Sensing properties of nickel electroplating protected Fiber Bragg Grating based on stress analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906002.  
谢剑锋, 王颖, 莫钊, 等. 基于应力分析的电镀保护光纤布喇格光栅传感性能分析[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906002.
- [7] FAN X Y, HE Z Y, KAZUO H. Novel strain- and temperature-sensing mechanism based on dynamic grating in polarization-maintaining erbium-doped fiber [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(2): 556-561.
- [8] TIAN Z B, SCOTT S H Y. In-line abrupt taper optical fiber Mach-Zehnder interferometric strain sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(3): 161-163.
- [9] GONG Y, RAO Y J, GUO Y, *et al.* Temperature-insensitive micro Fabry-Perot strain sensor fabricated by chemically etching Er-doped Fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(22): 1725-1727.
- [10] JIANG Xiao-feng, LIN Chun, XIE Hai-he, *et al.* Optic fiber MEMS pressure sensor based on white light interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1006003.  
江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. 白光干涉解调光纤 MEMS 压力传感器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1006003.
- [11] GONG H P, CHAN C C, CHEN LH, *et al.* Strain sensor realized by using low-birefringence photonic-crystal-fiber-based Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(16): 1238-1240.
- [12] FU H Y, TAM H Y, SHAO L Y, *et al.* Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(15): 2835-2839.
- [13] LÜ An-qiang, LI Yong-qian, LI Jing, *et al.* Simultaneous calibration method for strain and temperature of distributed sensing optical fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1206002.  
吕安强, 李永倩, 李静, 等. 分布式传感光纤应变和温度同时标定方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(12): 1206002.
- [14] CHIANG C C, CHEN Z J. A novel optical fiber magnetic sensor based on electroforming long-period fiber grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(19): 3331-3336.
- [15] SUN H, YANG S, ZHANG J, *et al.* Temperature and refractive index sensing characteristics of an MZI-based multimode fiber-dispersion compensation fiber-multimode fiber structure[J]. *Optic Fiber Technology*, 2012, **18**(6): 425-429.
- [16] NGUYEN L V, HWANG D, MOON S, *et al.* High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch [J]. *Optic Express*, 2008, **16**(15): 11369-11375.
- [17] MANOJ K, ARUN K, SAURABH M T. A comparison of temperature sensing characteristics of SMS structures using step and graded index multimode fibers [J]. *Optics Communications*, 2014, **312**: 222-226.
- [18] LI L C, XIE Z H, LIU D M. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(10): 11109-11120.