

基于 SPS 光纤结构的高灵敏度曲率传感器

陆杭林^{1,2}, 胡君辉^{1*}

¹广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004;

²暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

摘要 提出了一种基于单模-保偏-单模(SPS)结构的高灵敏度曲率光纤传感器,该传感器将保偏光纤(PMF)的两端熔接在两段单模光纤之间。研究了传感器的曲率传感性能,以及保偏光纤的长度对传感器曲率灵敏度的影响。结果表明,随着曲率的增大,传感器输出光谱出现明显红移现象;保偏光纤长度对传感器的曲率灵敏度有重要的影响,当保偏光纤长度为 11 cm,曲率为 0.43~1.37 m⁻¹时,获得最大灵敏度为 59.849 nm/m⁻¹的传感器。与其他光纤结构的传感器相比,该传感器具有结构简单、易于制造、灵敏度高等优点,可用于结构健康监测传感领域。

关键词 光纤光学; 曲率测量; 单模-保偏-单模结构; Sagnac 干涉仪

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.080601

High Sensitivity Curvature Sensor Based on SPS Fiber Structure

Lu Hanglin^{1,2}, Hu Junhui^{1*}

¹ School of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract A high sensitivity optical fiber curvature sensor with a fiber structure is proposed based on single mode-polarization maintaining-single mode (SPS), which is fabricated by splicing a piece of polarization-maintaining fiber (PMF) between two sections of single mode fiber. The curvature sensing performance and the effect of the length of PMF on the curvature sensitivity of this sensor are studied in experiments. The results show that, the output spectrum of this sensor shows an obviously red-shift phenomenon with the increase of curvature. In addition, the length of PMF has a significance influence on the curvature sensitivity of this sensor. In the curvature range from 0.43 m⁻¹ to 1.37 m⁻¹, the maximum sensitivity can reach to 59.849 nm/m⁻¹ when the length of PMF is 11 cm. This sensor has advantages of simple structure, easy fabrication and high sensitivity compared with the other optical fiber sensors with an optical fiber structure, and it can be used in the field of the structural health monitoring.

Key words fiber optics; curvature measurement; single mode-polarization maintaining-single mode structure; Sagnac interferometer

OCIS codes 060.2370; 060.2420; 280.4788

1 引言

物体的弯曲程度对于其结构稳定性至关重要,关于物体曲率的监测在工业生产、日常生活及科学研究等过程中有着重要的作用,如对大型建筑结构体的变形和沉降、飞行器的弯曲和变形以及高精度科研设备的弯曲和变形等过程。传统曲率的监测方

法是采用电传感器来监测,但电传感器存在诸多局限性,如易受电磁干扰、长距离传输信号损耗严重和监测结果精度不高等。相对于传统电学传感器,光纤传感器具有测量精确度高、抗干扰能力强、耐腐蚀、结构紧凑、信号频带宽、成本低廉等诸多优点。利用光纤传感器可以对曲率^[1-2]、压力^[3-4]、应变^[5]、温度^[6-8]、折射率^[9-12]、液位^[13-15]、振动^[16-18]、输油管

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-10-12; 录用日期: 2018-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61565002, 1307096)、广西重点研究开发项目(AB17129027)、广西研究生教育创新计划项目(XYCSZ2017083)

* E-mail: hujh@mailbox.gxnu.edu.cn

道参数^[19-20]等诸多参数实施监测。采用光纤级联的方法,同时把光纤熔接成葫芦状的曲率传感器,曲率灵敏度达 4.362 nm/m^{-1} ^[21]。利用级联光子晶体光纤研制的曲率传感器,获得的灵敏度为 -8.40 nm/m^{-1} ^[21]。在单模光纤中熔接一段多模光纤构成单模光纤-多模光纤-单模光纤结构(SMS)的曲率传感器,获得的灵敏度为 -10.38 nm/m^{-1} ^[22]。基于马赫-曾德尔干涉仪原理,将光纤错位制成花生形结构的曲率传感器^[23],获得的灵敏度为 22.47 nm/m^{-1} 。将单模光纤熔接成锥状的光纤曲率传感器^[24],有效地节约了成本并获得了一 31.82 nm/m^{-1} 的灵敏度。此外,陈大风等^[25]利用单模光纤-鼓包光纤-保偏光子晶体光纤-多模光纤-单模光纤组成的曲率传感器灵敏度高达 93.95 nm/m^{-1} ,但是光子晶体光纤较为昂贵,导致传感器成本较高^[21,25]。

本文利用保偏光纤和单模光纤制作出单模光纤-保偏光纤-单模光纤结构(SPS)的光纤传感器,并将其置于传统的 Sagnac 干涉仪中作为曲率传感器,研究传感器的传感性能和保偏光纤(PMF)长度对传感器曲率灵敏度的影响。

2 实验装置和原理

选用一段美国 Nufern 公司 PM1550-HP 熊猫型小模场保偏光纤(其纤芯直径为 $8.5 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$,在波长为 1550 nm 时拍长为 3 mm),将其两端分别与单模光纤对芯熔接(光纤熔接机型号为日本 Fujikura 公司 FSM-60S 型),制成 SPS 光纤传感器,其结构如图 1 所示,图中 L_p 为保偏光纤的长度。

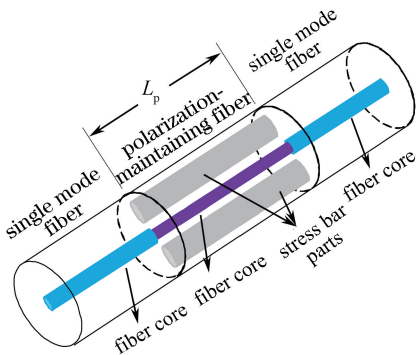


图 1 SPS 光纤传感器结构示意图

Fig. 1 Diagram of SPS fiber sensor structure

进行曲率测量实验时,需将 SPS 光纤传感器紧密附着在塑料刻度尺上。将附着有光纤传感器的塑

料刻度尺固定于光学调节架上,通过旋转光学调节架上的螺旋测微器使调节架向左移动,在外力作用下,载有传感器的塑料刻度尺向上弯曲。由于传感器紧密附着在塑料刻度尺上,因此可认为传感器与塑料刻度尺发生同步弯曲。利用 3 dB 耦合器将传感器组成 Sagnac 干涉仪结构,将美国 UC INSTRUMENTS 公司 GM8035 型激光宽带光源(BBS)的输出端和 3 dB 耦合器的输入端连接好,将 3 dB 耦合器的输出端和日本 YOKOGAWA 公司 AQ6370C 型光谱仪(OSA)的输入端连接好。宽带光源发出的激光注入 3 dB 耦合器,经耦合器后产生两束沿相反方向传播的激光,两束激光传播一周后在 3 dB 耦合器处耦合输出,具体的光路结构如图 2 所示,图中 L 为光纤支架间的距离, Δx 为每次向前推进的距离。

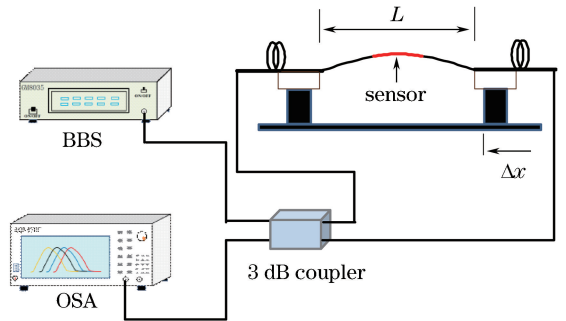


图 2 曲率测量实验的光路示意图

Fig. 2 Light path in curvature measurement experiment

该方案设计两组实验,实验一对传感器进行直接通光,实验二采用 Sagnac 干涉仪结构后通光,均无曲率及恒温条件下采集光谱,其透射光谱分别如图 3(a)和图 3(b)所示,两图中保偏光纤长度均为 7 cm 。对比图 3(a)和(b)可以发现,采用 Sagnac 干涉仪结构后谐振波谷的消光比大幅提高,获得的谐振波谷更窄,干涉图样更好。

载有传感器的物体的曲率 C 可以表示为^[26]

$$C = \frac{1}{\rho} \cong \sqrt{\frac{24\Delta x}{L_0^3}}, \quad (1)$$

式中: ρ 为载有光纤传感器的物体发生弯曲变形后的曲率半径; L_0 为两个光学调节架之间的初始距离。在螺旋测微器向前推进的过程中,光纤传感器随着塑料尺弯曲,光纤的纤芯和包层受到不同程度的挤压和拉伸,所以光纤纤芯和包层的折射率会产生相应的变化。光纤的弯曲导致纤芯和包层发生不同程度的变形,两者之间受到的应力不同,应力差 $\Delta\epsilon$ 可以表示为^[27]

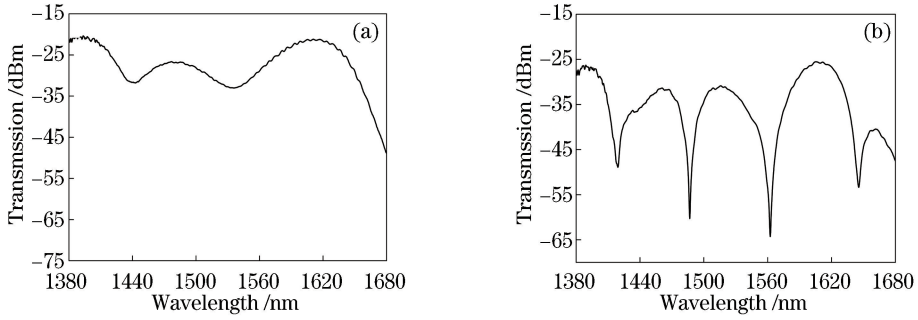


图3 传感器通光后的透射光谱。(a)直接通光;(b)嵌入 Sagnac 干涉仪结构后通光
Fig. 3 Transmission spectra of sensor after light passing. (a) Light directly passing;
(b) light passing after employing Sagnac interferometer

$$\Delta\epsilon = d/\rho, \quad (2)$$

式中: d 为光纤中的纤芯到包层间的距离。传感器中的保偏光纤具有高双折射,快慢轴的折射率差 $\Delta n_{\text{eff}_0} = n_s - n_f$, n_s 和 n_f 分别是保偏光纤慢轴和快轴的有效折射率。当保偏光纤弯曲时,快慢轴的折射率差会发生相应地改变,从而导致干涉谱发生漂移。当保偏光纤发生弯曲或应变时,其快慢轴的折射率差可以表示为^[28]

$$\Delta n_{\text{eff}} = \Delta n_{\text{eff}_0} + k\Delta\epsilon, \quad (3)$$

式中: Δn_{eff_0} 为传感光纤在无应变时快慢轴的折射率差; k 为光纤的应变折射率系数。此时干涉谱谐振波谷的波长 λ_m 可以表示为^[29]

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}_0}L}{2N+1} + \frac{2kLd}{2N+1} \times \frac{1}{\rho}, \quad (4)$$

式中: N 为光谱干涉级数, $N = 1, 2, 3, \dots$ 。在传感光纤无弯曲且保偏光纤长度为 7 cm 时,对获得的实验结果进行快速傅里叶变换,得到的空间频率谱如图 4 所示。由图 4 可见,由于保偏光纤慢轴和快轴的模式和纤芯模占主要成分,干涉谱主要是由保偏光纤的双折射效应引起。由(1)~(4)式可以得到

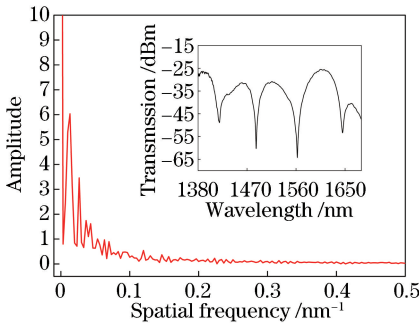


图4 保偏光纤长度为 7 cm 时传感器的空间频率谱
Fig. 4 Spatial frequency spectrum of sensor when the length of PMF is 7 cm

$$\lambda_m = \frac{2L}{2N+1} \cdot \Delta n_{\text{eff}_0} + \frac{2Lkd}{2N+1} \cdot \sqrt{\frac{24\Delta x}{L_0^3}}. \quad (5)$$

因此,螺旋测微器向前推进使得传感光纤弯曲,保偏光纤的双折射发生改变,从而促使光谱发生漂移。

由以上分析可知,在传感光纤长度一定时,干涉谱谐振波谷的波长和曲率呈线性关系,因此可以通过干涉谱谐振波谷波长的变化来反映物体曲率的大小,从而实现测量曲率的目的。

3 实验结果与讨论

因为 Sagnac 干涉仪对温度非常敏感,为了避免环境温度对实验结果的干扰,整个曲率测量实验都是在恒温环境下进行。首先采用保偏光纤长度为 7 cm 时的传感器进行实验,两个光学调节架的初始距离设为 40 cm,光学调节架每次向前推进量 $\Delta x = 0.5$ mm,直到总推进量为 5.0 mm 时停止。实验时螺旋测微器每推进一个 Δx 就采集一组数据,共 10 组数据,得到的干涉谱如图 5 所示。

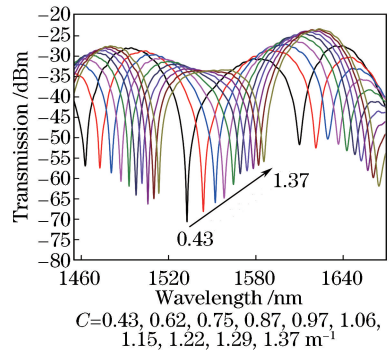


图5 保偏光纤长度为 7 cm 时传感器不同曲率 C 时测得的干涉谱

Fig. 5 Interference spectra of curvature measurement for sensor when the length of PMF is 7 cm

由图 5 发现, 载有光纤传感器的物体曲率增加时, 传感器的干涉谱发生了明显的红移。因为曲率增加, 传感器的弯曲程度会明显加大, 传感部分的光纤纤芯和包层间的有效折射率差增大, 根据(4)式可知, 光谱干涉条纹的波长增加, 谱线向长波方向移动, 故通过监测干涉谱谐振波谷的波长变化即可实现对曲率的测量。

选取 1530 nm 附近的谐振波谷作为干涉观察点, 提取其中实验数据进行线性分析, 结果如图 6 所示。由图 6 可见传感器的线性相关系数 R^2 达 0.999, 获得的灵敏度为 56.140 nm/m^{-1} 。可见, 此传感器对曲率的线性响应很好, 并且灵敏度较高, 能够较好地实现曲率的测量。

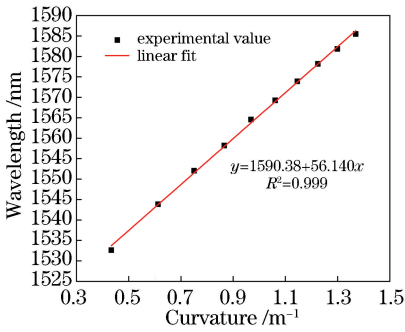


图 6 保偏光纤长度为 7 cm 时传感器的线性分析

Fig. 6 Linear analysis of sensor when length of PMF is 7 cm

为了进一步考查传感器的测量一致性, 利用保偏光纤长度为 7 cm 时的传感器进行往返重复测量实验, 结果如图 7 所示。观察图 7 发现, 正向往前推进螺旋测微器使传感器弯曲和反向后退螺旋测微器使传感器恢复时, 两组实验数据不能完全重合, 并且返回时获得的灵敏度要高些, 达到了 62.931 nm/m^{-1} , 正反向两次实验的灵敏度差为 -6.791 nm/m^{-1} 。

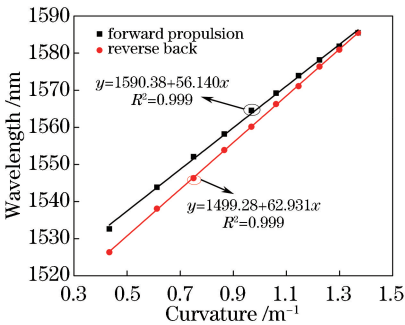


图 7 保偏光纤长度为 7 cm 时传感器的往返重复实验结果

Fig. 7 Round trip repeat test of sensor when the length of PMF is 7 cm

导致两组数据不能重合的主要原因是塑料刻度尺在获得能量产生弯曲和释放能量回弹时, 塑料刻

度尺的材料存在弹性回滞, 导致进行往返重复实验结果不能完全重合。实际工程应用中, 如果测量对象为弹性回滞较小的刚性材质的物体时, 这种现象对测量结果的影响会减小。

保偏光纤长度过短时, 干涉谱谐振波谷数量过少且干涉效果差, 不利于观察; 保偏光纤长度过长时, 干涉谱谐振波谷数量过多, 会导致测量范围偏小。综合考虑保偏光纤长度对传感器的灵敏度的影响, 制作 4 种保偏光纤长度不同的 SPS 光纤传感器进行实验, 保偏光纤的长度分别为: 7.0, 9.0, 11.0, 13.0 cm, 实验结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 4 个实验获得的相关系数均能达到 0.99 以上。此外, 保偏光纤长度的不同, 对曲率灵敏度的影响不同。当保偏光纤长度为 11 cm 时的传感器灵敏度最高, 达到 59.849 nm/m 。

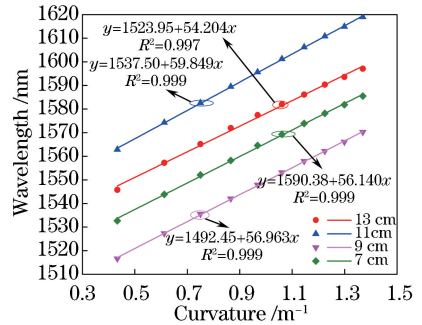


图 8 不同保偏光纤长度下传感器的线性对比

Fig. 8 Linear correlation contrast of sensors under different lengths of PMF

在物体弯曲的程度保持不变, 即曲率恒定时, 保偏光纤越短, 相当于在曲线中截取一段较短的弧线, 即可视为直线或曲率变小的弧线, 传感器纤芯和包层间的应力差将会越小, 两者间的有效折射率差也会越小, 导致光谱干涉条纹移动距离也越小, 所以传感器灵敏度降低。而当保偏光纤长度超出一定界限时, 规律失去。实验总结发现, 在保偏光纤长度为 11 cm 时获得的传感器灵敏度最高。

4 结 论

本研究设计并制作了基于 SPS 光纤结构的光纤曲率传感器, 研究了传感器对曲率的响应特性, 并研究了保偏光纤长度对传感器曲率灵敏度的影响。研究结果表明, 保偏光纤的长度对传感器的曲率灵敏度有重要影响, 在保偏光纤长度为 11 cm 时, 获得最高曲率灵敏度为 59.849 nm/m^{-1} 的传感器。与目前已有的光纤曲率传感器相比, 此传感器具有结构简单、灵敏度高且线性响应效果好的特点, 可以有效

地降低传感器的制作成本及工艺要求,能够较好地实现对物体曲率变化的测量以及大型建筑结构体的健康监测等。本研究对于保偏光纤快慢轴的偏转对曲率灵敏度的影响,以及在曲率监测过程中传感光纤的扭转对灵敏度的影响未做深入研究,下一步工作应该重点关注。

参 考 文 献

- [1] Cano-Contreras M, Guzman-Chavez A D, Mata-Chavez R I, *et al.* All-fiber curvature sensor based on an abrupt tapered fiber and a Fabry-Pérot interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(22): 2213-2216.
- [2] Dong S D, Dong B, Yu C Y, *et al.* High sensitivity optical fiber curvature sensor based on cascaded fiber interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 1125-1130.
- [3] Wang T T, Li Z P, Shen J. A design of optic fiber pressure sensor based on micro in-fiber ellipsoidal cavity[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(6): 789-805.
- [4] Tang J, Yin G L, Liu S, *et al.* Gas pressure sensor based on CO₂-laser-induced long-period fiber grating in air-core photonic bandgap fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1-7.
- [5] Zhang S, Huang Z H, Li G F, *et al.* Temperature-insensitive strain sensing based on few mode fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0120002.
张珊, 黄战华, 李桂芳, 等. 温度不敏感的少模光纤应变传感[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0120002.
- [6] Qian Z H, Gong H P, Yang X, *et al.* Optical fiber temperature sensor based on modal interferometer comprising two peanut-shape structures [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 57(12): 2841-2844.
- [7] Kumar A, Jindal R, Varshney R K, *et al.* A fiber-optic temperature sensor based on LP₀₁-LP₀₂ mode interference[J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6(1): 83-90.
- [8] 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.
- [9] An G W, Hao X P, Li S G, *et al.* D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance [J]. Applied Optics, 2017, 56

(24): 6988-6992.

- [10] Sun H, Hu M L, Qiao X G, *et al.* Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0205001.
孙浩, 忽满利, 乔学光, 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205001.
- [11] Qian C L, Chen M Y. Investigation on refractive index sensing based on interference effect in multimode optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050601.
钱春霖, 陈明阳. 基于多模干涉效应的光纤折射率传感技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050601.
- [12] Wang Q, Zou H, Wei W. Strain and refractive index sensor based on core-offset splicing fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1006005.
王旗, 邹辉, 韦玮. 基于偏芯熔接光纤的应力与折射率传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1006005.
- [13] Dong Y, Xiao S Y, Xiao H, *et al.* An optical liquid-level sensor based on D-shape fiber modal interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(13): 1067-1070.
- [14] Tong B. Double-fiber Fabry-Perot interferometry optical fiber liquid level sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8351: 8351OT.
- [15] Shao M, Han L, Zhao X, *et al.* Liquid level sensor based on in-fiber Michelson interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328021.
邵敏, 韩亮, 兆雪, 等. 基于在线型光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328021.
- [16] Guzman-Sepulveda J R, Hernandez-Romano I, Torres-Cisneros M, *et al.* Fiber optic vibration sensor based on multimode interference effects [C] // 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics, May 6-11, 2012, San Jose, California United States. Washington: Optical Society of America, 2012: JW2A.117.
- [17] Ran Y L, Xia L, Han Y, *et al.* Vibration fiber sensors based on SM-NC-SM fiber structure [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 14979341.
- [18] Wang H R, Gao R X, Yin Y X, *et al.* Vibration sensor based on single mode-multimode optic-fiber cantilever structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 060601.
王红日, 高仁喜, 殷焱焱, 等. 基于单模-多模光纤悬

- 臂梁型振动传感器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 060601.
- [19] Yan S Z, Chyan L S. Performance enhancement of BOTDR fiber optic sensor for oil and gas pipeline monitoring[J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16(2): 100-109.
- [20] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Vectorial dislocation monitoring of pipelines by use of Brillouin-based fiber-optics sensors [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(1): 015006.
- [21] Fu G W, Li Y P, Fu X H, *et al.* Temperature insensitive curvature sensor based on cascading photonic crystal fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 41: 64-68.
- [22] Gong Y, Zhao T, Rao Y J, *et al.* All-fiber curvature sensor based on multimode interference [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 679-681.
- [23] Sun M M, Wang J F, Jin Y X, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder interferometer based on lateral-offset and peanut shape structure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1560-1564.
孙明明, 王剑锋, 金永兴, 等. 基于错位和花生形结构的全光纤马赫-曾德干涉仪的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1560-1564.
- [24] Zhang C, Zhao J F, Miao C Y, *et al.* High-sensitivity all single-mode fiber curvature sensor based on bulge-taper structures modal interferometer [J]. Optics Communications, 2015, 336: 197-201.
- [25] Chen D F, Lu P, Liu D M. Highly sensitive curvature sensors based on polarization-maintaining photonic crystal fibers[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 450-452.
陈大风, 鲁平, 刘德明. 基于保偏光子晶体光纤的高灵敏度曲率传感器[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 450-452.
- [26] Wang Y P, Richardson D, Brambilla G, *et al.* Intensity measurement bend sensors based on periodically tapered soft glass fibers [J]. Optics Letters, 2011, 36(4): 558-560.
- [27] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, *et al.* Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre[J]. Electronics Letters, 2000, 36(2): 120-121.
- [28] Ding J F, Zhang A P, Shao L Y, *et al.* Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(6): 1247-1249.
- [29] Gong H P, Yang X, Ni K, *et al.* An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(1): 22-24.