

引用格式: HAN Xiao-peng, LIU Chun-yu, ZHAO Chun-long, *et al.* A DOT Structure Based on Mach-Zehnder Interference Principle for Simultaneous Strain and Temperature Sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0806004

韩晓鹏,柳春郁,赵纯龙,等. 基于马赫曾德尔干涉原理的优化双锥结构应变温度同步传感[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0806004

基于马赫曾德尔干涉原理的优化双锥结构应变 温度同步传感

韩晓鹏¹, 柳春郁^{1,2}, 赵纯龙¹, 苏杭¹, 杨九如²

(1 黑龙江大学 电子工程学院, 哈尔滨 150080)

(2 电子工程黑龙江省高校重点实验室, 黑龙江大学, 哈尔滨 150080)

摘 要:设计了一种基于光纤马赫曾德尔干涉仪的优化双凹锥结构。该结构通过单模光纤和保偏光纤之间使用不充分的电弧放电熔接制作而成,可以实现应变和温度的同步测量。凹锥中部的球形纤芯可以进一步地调控包层和纤芯中的光能量分布,经优化几何参数后的结构可以获得 16 dB 的干涉条纹消光比,大于相同参数下的双凹锥结构。传感实验表明所提出的结构在 0~244.35 $\mu\epsilon$ 和 25~50 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内分别具有 $\pm 1.616 \mu\epsilon$ 和 $\pm 0.79^{\circ}\text{C}$ 的高分辨率。由于交叉敏感导致两个参数的测量误差均小于 $1 \times 10^{-3}\%$ 。这种结构为同时测量应变和温度提供了一种有效的方法,可应用于精密仪器测量中。

关键词: 光纤传感器; MZI 干涉仪; 优化双凹锥; 应变; 温度

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204908.0806004

A DOT Structure Based on Mach-Zehnder Interference Principle for Simultaneous Strain and Temperature Sensing

HAN Xiao-peng¹, LIU Chun-yu^{1,2}, ZHAO Chun-long¹, SU Hang¹, YANG Jiu-ru²

(1 College of Electronics Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

(2 Key Lab of Electronics Engineering, Colleges of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper, a dual optimized down taper structure based on fiber Mach-Zehnder interferometer is designed. This structure is manufactured by using insufficient arc discharge splicing between single-mode fiber and polarization-maintaining fiber method, achieving simultaneous measurement of strain and temperature. The spherical core which located at the middle of the down taper can further regulate the light power distribution in the core and cladding area. The optimized structure can obtain a larger interference fringe extinction ratio of 16 dB, which is greater than the dual-down taper structure under the same parameters. Sensing experiments show that the proposed structure has high resolutions of $\pm 1.616 \mu\epsilon$ and $\pm 0.79^{\circ}\text{C}$ in the range of 0~244.35 $\mu\epsilon$ and 25~50 $^{\circ}\text{C}$, respectively. The measurement error of both parameters is less than $1 \times 10^{-3}\%$ due to cross-sensitivity. This structure provides a promising method for simultaneous measurement of strain and temperature, which can be applied to precision instrument measurement.

Key words: Optical fiber sensor; MZI interferometer; Dual optimized down-taper; Strain; Temperature

OCIS Codes: 060.2370; 120.2230; 300.6170; 130.6010

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61675066, 61302075), 黑龙江省自然科学基金(No.QC2015068)

第一作者: 韩晓鹏(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: 329570979@qq.com

导师(通讯作者): 柳春郁(1975-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术和光纤有源、无源器件等. Email: liuchunyu@hlju.edu.cn

收稿日期: 2020-04-13; 录用日期: 2020-05-28

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

0 引言

光纤传感技术以其高灵敏度,抗电磁干扰,电绝缘,耐腐蚀,响应速度快等优点在国内外研究中更加深入和成熟^[1].马赫曾德尔干涉(Mach-Zehnder interference, MZI)原理因其在各种干涉原理中具有简单而稳定的特性而被广泛用于光学干涉测试中.根据MZI原理,测试的单一物理参量可以为温度^[2-5]、折射率^[6-12]、液位^[13-14]、应变^[15]和曲率^[16-17].但是大多数基于MZI的传感器具有多参数响应,很难对单个参数进行准确的测量.所以对应变和温度的同步传感是实现精确测量的方式之一.

近年来,各种光纤结构被用来同步测量温度和应变.例如级联的光纤锥^[18-19],DONG Shan-dong^[18]通过级联四个凸锥的结构以实现温度和应变的同时测量,灵敏度分别为 $112 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.4 \text{ pm}/\mu\epsilon$.基于纤芯失配的原理构造的MZI结构也是一种有效的方法^[20-21].XING Rui^[20]级联多模光纤和保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)获得更大的干涉条纹对比度,传感器的温度和应变灵敏度分别为 $1.27 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $49 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.HUANG Bing-sen^[22]在光纤中嵌入微腔结构作为MZI分束器,因为它比传统的光分束器具有更小的尺寸和更高的稳定性,该结构所对应的应变和温度的最大灵敏度分别为 $4.24 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $72.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.为了减少外环境对实验结果的影响,一些特种光纤被用作传感结构材料^[23-24].如ZHENG Jia-rong^[23]将光子晶体光纤和单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)拼接构建出的MZI结构可以避免包层模式参与耦合,应变和温度灵敏度分别为 $2.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $13.24 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.然而多个级联结构存在难以封装、引入较大传输损耗等问题,而且光子晶体光纤在实际应用中增加了成本.因此在双参数测量中制造一种低成本、高灵敏度的传感结构是至关重要的.

本文利用SMF和PMF之间的不充分电弧放电熔接来制作优化双凹锥结构(Dual Optimized down-Taper, DOT).这样的MZI结构在测量应变和温度时具有较高灵敏度潜力.实验结果表明,应变和温度的分辨率分别可以达到 $\pm 1.616 \mu\epsilon$ 和 $\pm 0.79 ^\circ\text{C}$.由温度与应变之间的交叉敏感因素导致温度和应变测量的相对误差小于 $1 \times 10^{-3} \%$,该DOT结构在精密仪器测量中具有潜在应用价值.

1 传感器的制作与原理

1.1 传感结构的制备

DOT结构的制作过程如图1所示.首先将一定长度PMF(PM15-106 002-3, $d_{\text{core}} = 7 \mu\text{m}$, $d_{\text{clad}} = 125 \mu\text{m}$)固定在光纤熔接机(Fujikura FSM-100P)的夹具上,调整电极位置使其与锥形区域的中心部位对齐.其次,将拉锥长度设定为 0.43 mm 并调用拉锥程序对光纤进行电弧拉锥操作,如图1(b)所示.利用与上述相同的方式处理SMF.如图1(c)所示,利用光纤切割刀将锥形光纤沿中心对称切为均等两部分.将切断后的SMF和PMF重新固定在夹具上,调控步进电极使两段光纤沿轴相对齐,通过调用最佳熔接程序重新熔接切断后的SMF和PMF,如图1(d)所示.熔接程序中的电弧熔接放电功率为 20 bit ,放电持续时间为 1500 ms ,光纤两端面间距为 $15 \mu\text{m}$.

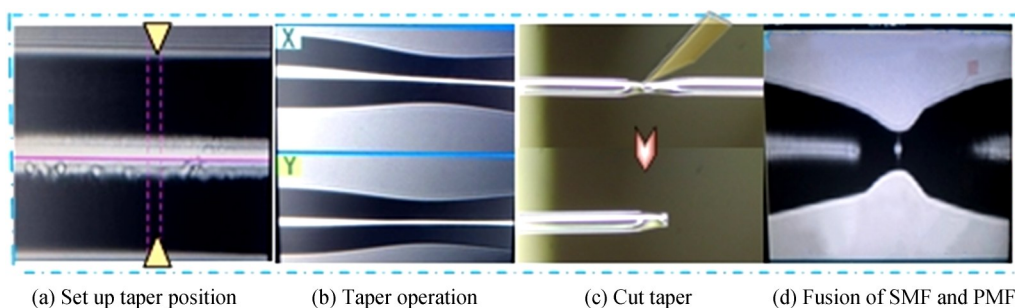


图1 DOT结构制作过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fabrication process of the DOT

1.2 模式干涉及传感原理

PMF的截面图如图2(a)所示,纤芯、包层、应力区直径分别表示为 R_1 、 R_2 、 R_3 .DOT结构如图2(b)所示,

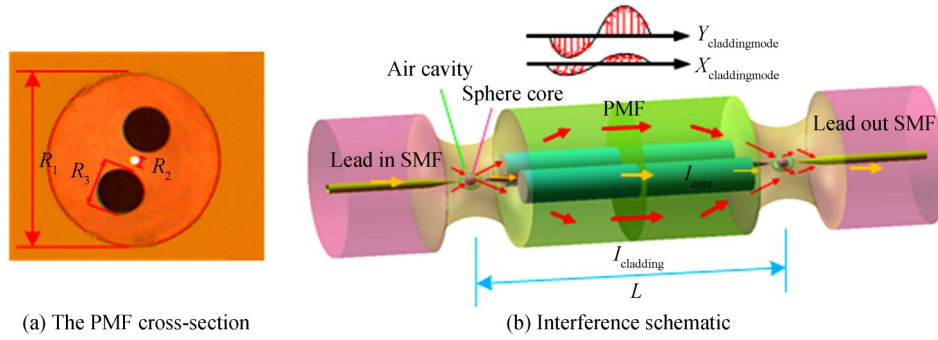


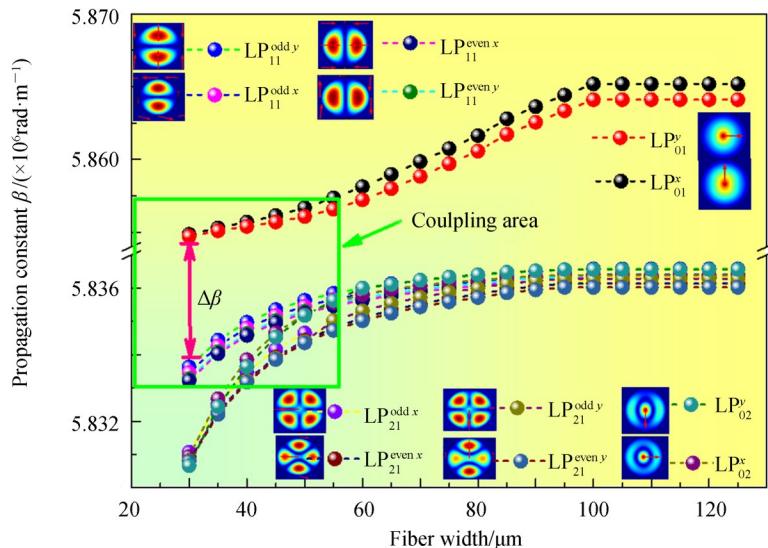
图2 基于MZI的优化双凹锥示意图
Fig.2 Schematic diagram of DST based on MZI

由两段导入/导出 SMF 和一段 PMF 组成. 当光传播到一级凹锥区域时, 部分光能量泄漏到包层区域并激发出多种包层模式, 并同时沿 PMF 的 x 、 y 两正交方向传输. 凹锥中部的球状纤芯区域在原凹锥分光比的基础上进一步实现纤芯能量 I_{core} 和包层能量 I_{cladding} 的分配, 入射光沿着 PMF 以能量包的形式从前面的光纤模式随机传播到后面的光纤模式, 且在传输过程中偏振模式保持恒定. 当入射光传输到第二个凹锥区域时, 大多数包层模式功率将重新耦合到纤芯中, 从而导致不同光纤模式之间的耦合. 该 MZI 结构中两个凹锥区域分别充当光纤分束器、合束器的作用. 一个典型的双模 MZI 结构, 根据相位匹配条件 $\Delta\varphi = (2N + 1)\pi$ 发生干涉, 且 N 为整数. 则干涉谷的特征波长可以表示为

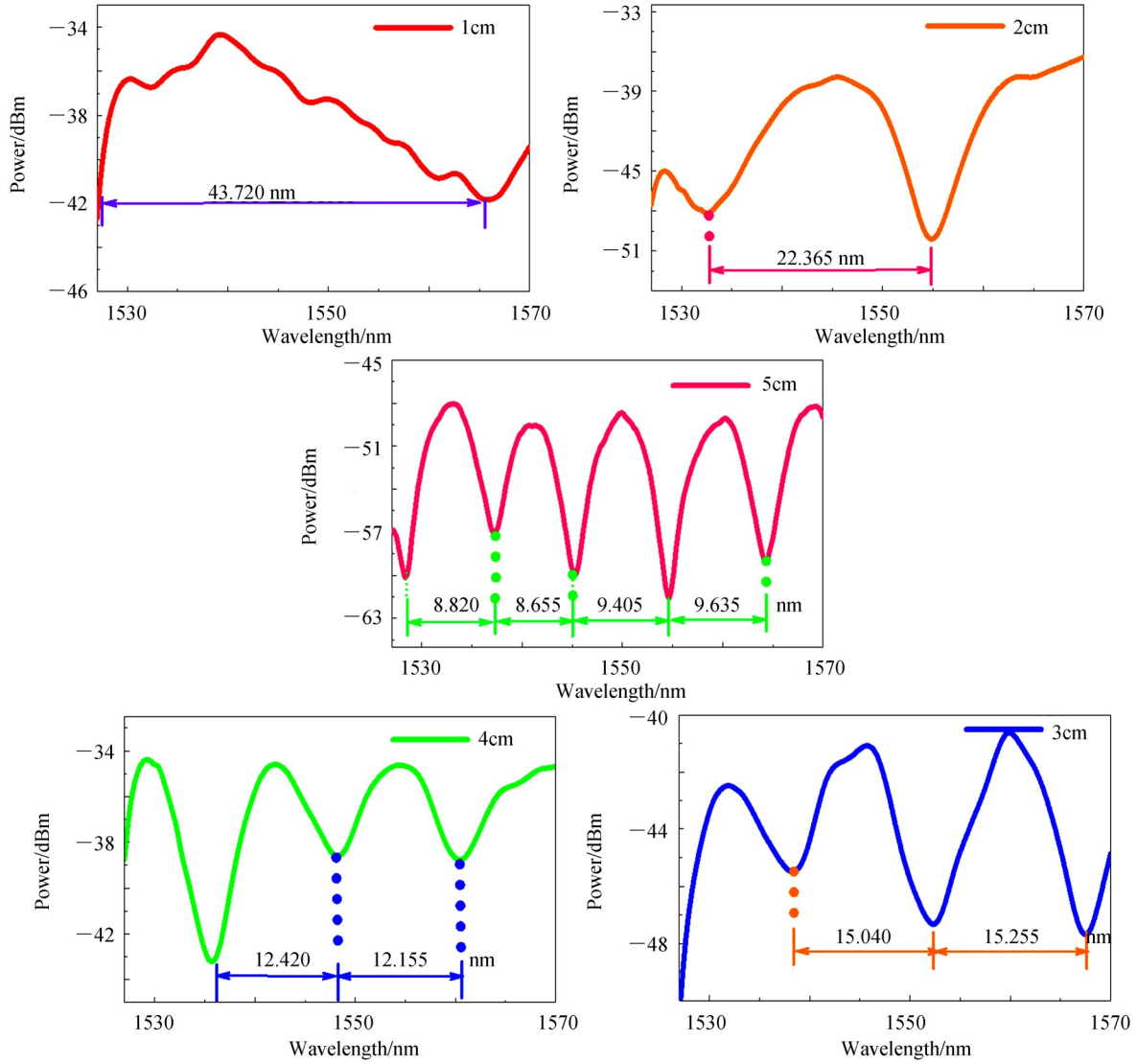
$$\lambda_{\text{dip}} = \frac{2 \cdot (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}) L}{2N + 1} \quad (1)$$

式中, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别表示纤芯和包层模式的有效折射率, λ 为入射光的波长, L 为 PMF 的长度.

根据图 2(a) 所示的 PMF 的截面结构建立仿真模型, 其中 $R_1 = 125 \mu\text{m}$, $R_2 = 7 \mu\text{m}$, $R_3 = 30 \mu\text{m}$. 利用有限元方法模拟了光纤结构中的模式场分布情况. 不同偏振方向的包层模式对应的传播常数基本一致, 因此可以近似简并为同一个包层模式. 如图 3(a) 所示为不同锥区直径与光纤模式传播常数的关系, 可以看出当光纤直径从 $125 \mu\text{m}$ 减小到 $30 \mu\text{m}$ 时, 由于破坏了几何形状导致 PMF 中存在的应力被释放, 对应纤芯模式的传播常数逐渐减小. 纤芯模式和各阶包层模式之间的传播常数差逐渐减小, 导致纤芯模式与不同包层模式发生不同程度的耦合. 由于纤芯模式 LP_{01} 与包层模式 LP_{11} 之间的传播常数差很小, 耦合区域内该两种模式之间的平均传播常数差 $\overline{\Delta\beta} = 2.11716 \times 10^4$, 所以主要发生 LP_{01} 和 LP_{11} 模式间的干涉, 其他模式仅对光谱起到轻



(a) Relationship between fiber mode propagation constant and different taper width



(b) Transmission spectra with different lengths

图3 基于DOT结构的模式干涉分析

Fig.3 Mode interference analysis based on DOT structure

微调制作用.在保证实验参数一致的情况下分别制作 $L=1\sim 5$ cm的DOT干涉结构,对应的透射光谱如图3(b)所示.由图3可知,在同一波段范围内的干涉谷数目与干涉长度呈正相关,且自由光谱范围(Free Spectral Range,FSR)逐渐减小.其中对于 $L=5$ cm的结构,由于FSR的理论值和实验值之差为0.046 25 nm,因此我们选择干涉长度为5 cm的结构进行后续实验研究.

当轴向应变施加到传感结构上,由光纤的弹光效应可知 L 和有效折射率差 Δn_{eff} 将发生改变.干涉谷所以对特征波长随轴向应变的变化关系可以表示为^[24]

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{dip}}}{\Delta\varepsilon} = \lambda_{\text{dip}}(1 - p_e) \quad (2)$$

式中, p_e 表示有效弹光系数.由于光纤的热光效应和热膨胀效应, Δn_{eff} 和 L 会随着温度的变化而改变.干涉谷对应特征波长随温度变化的关系表示为

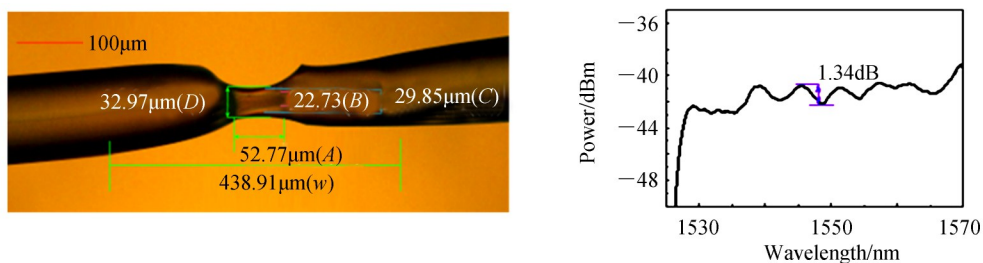
$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{\lambda_{\text{dip}}}{\Delta n_{\text{eff}} L} \left[\Delta n_{\text{eff}} \alpha L \Delta T + (\xi_1 n_{\text{eff, core}} - \xi_2 n_{\text{eff, cladding}}) L \right] \quad (3)$$

式中, α 是光纤的热膨胀系数, ξ_1 和 ξ_2 分别为光纤纤芯、包层模式的热光系数.

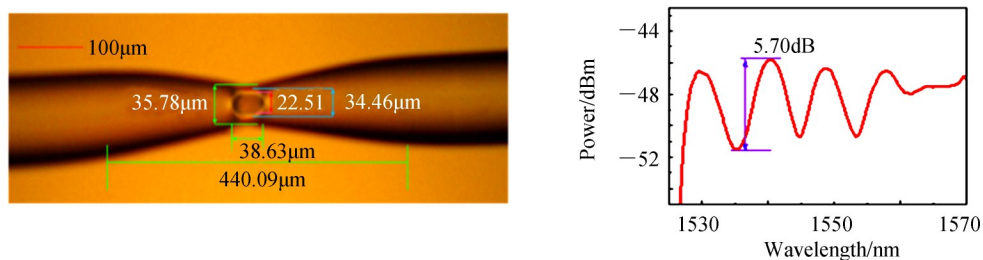
2 实验分析

2.1 传感结构分析

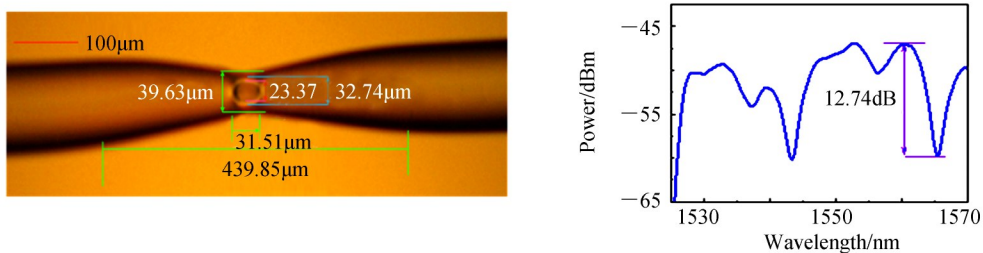
根据 1.1 节中传感结构的制作方式,更改端面间隔和熔接放电量以制作出不同球型纤芯尺寸的 DOT 结构.如图 4 所示为不同结构的电子显微图和所对应的透射光谱图.DOT 的几何参数见各图,其中, A 表示球芯的横轴长度, B 表示球芯的纵轴长度, C 表示空气腔的纵向长度, D 和 W 分别表示锥区的最短直径和锥长.



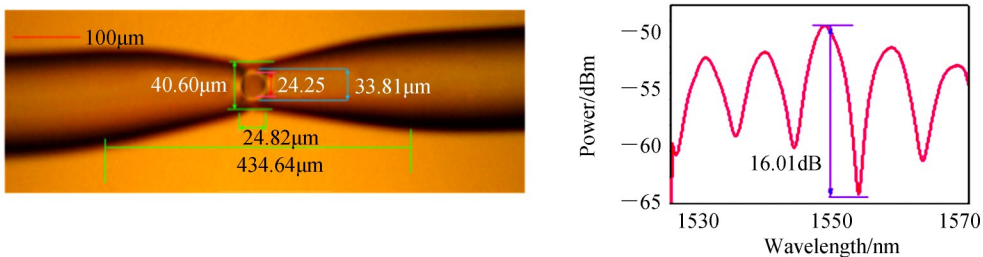
(a) Microscope image and corresponding transmission spectrum of DOT-a structure



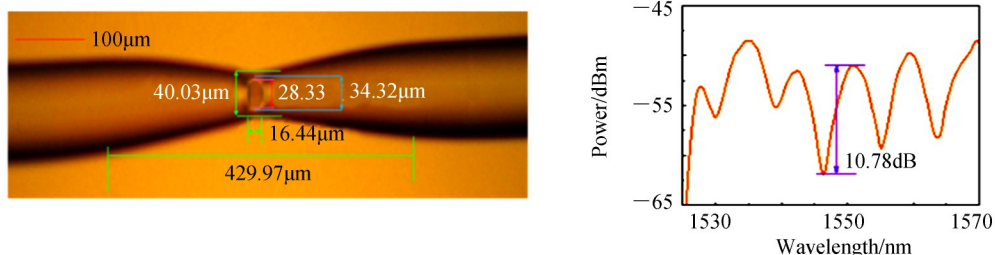
(b) Microscope image and corresponding transmission spectrum of DOT-b structure



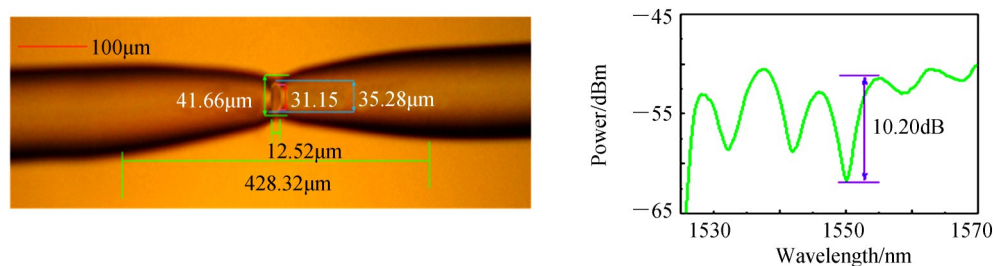
(c) Microscope image and corresponding transmission spectrum of DOT-c structure



(d) Microscope image and corresponding transmission spectrum of DOT-d structure



(e) Microscope image and corresponding transmission spectrum of DOT-e structure



(f) Microscope image and corresponding transmission spectrum of DOT-f structure

图4 DOT结构的电子显微图像及相应的透射光谱

Fig.4 Microscope images of DOT structure and corresponding transmission spectrum

DOT-a~ DOT-f结构的有效干涉长度均为5 cm.如图4所示, DOT-a($A=52.77 \mu\text{m}$, $B=22.73 \mu\text{m}$, $C=29.85 \mu\text{m}$, $D=29.85 \mu\text{m}$, $W=438.91 \mu\text{m}$)所对应透射光谱的最大消光比(ER)为1.34dB. 结构DOT-b($A=38.63 \mu\text{m}$, $B=22.51 \mu\text{m}$, $C=34.46 \mu\text{m}$, $D=35.78 \mu\text{m}$, $W=440.09 \mu\text{m}$)对应透射光谱的最大ER为5.70 dB. 结构DOT-c($A=23.37 \mu\text{m}$, $B=31.51 \mu\text{m}$, $C=32.74 \mu\text{m}$, $D=39.63 \mu\text{m}$, $W=438.91 \mu\text{m}$)可以获得的最大ER为12.74 dB. 结构DOT-d($A=24.82 \mu\text{m}$, $B=24.25 \mu\text{m}$, $C=33.81 \mu\text{m}$, $D=40.60 \mu\text{m}$, $W=434.64 \mu\text{m}$)和DOT-e($A=16.44 \mu\text{m}$, $B=28.33 \mu\text{m}$, $C=34.32 \mu\text{m}$, $D=40.03 \mu\text{m}$, $W=429.97 \mu\text{m}$)对应的最大ER分别为16.01 dB和10.78 dB. 结构DOT-f($A=12.52 \mu\text{m}$, $B=31.15 \mu\text{m}$, $C=35.28 \mu\text{m}$, $D=41.66 \mu\text{m}$, $W=428.32 \mu\text{m}$)对应透射光谱的最大ER为8.70 dB. 对比上述实验结果可以得到当凹锥中部的球形纤芯近似于圆球状时,所对应的干涉条纹的ER可以达到较高数值.

根据上述结构参数并使用光束传播方法(Beam Propagation Method, BPM)描述DOT结构的理论透射光谱. 设定 $L=5 \text{ cm}$, PMF芯/包层的直径和有效折射率分别为 $7.0/125 \mu\text{m}$ 和 $1.4457/1.4389$. SMF的芯/包层直径和有效折射率分别为 $8.3/125 \mu\text{m}$ 和 $1.4525/1.4381$, 自由空间波长设置为 1550 nm , 模拟环境介质的折射率 $n_0=1$. 通过模拟分析发现: DOT结构所对应透射光谱ER与凹锥中部纤芯的椭圆度 $x=\pm\sqrt{1-(A/B)^2}$ 呈高斯函数状分布. 当球芯的几何结构越趋于圆对称时(即 $x=0$)时, 透射光谱的ER越大. 并且ER随着 x 偏离0程度的增加而减小. 模拟与实验趋势基本一致, 这是由于锥区中部的球状纤芯充当类凸透镜的作用, 所对应的焦距越小则聚光能力愈强, 进而调控纤芯与包层中光能量的比例. 由式(4)可知二者的比例近似相等时, 干涉条纹ER最大. 当纤芯的几何结构从扁平椭圆趋于中心对称圆时, 焦距逐渐减小, 包层中的光能量大部分被重新耦合回纤芯中. 因此干涉条纹的ER逐渐增加. 由于在球芯光纤端面上存在正比于入射光角度的菲涅尔反射损耗 R , 当纤芯的几何结构从中心对称圆趋于竖直椭圆时, 入射角度逐渐增大. 反射损耗使得耦合回纤芯中的光能量值减小, 因此透射光谱的ER随椭圆度 x 的增加而减小.

$$\text{ER} = 10 \log \left(\frac{1 + \sqrt{I_{\text{core}}/I_{\text{clad}}}}{1 - \sqrt{I_{\text{core}}/I_{\text{clad}}}} \right)^2 \quad (4)$$

结合上述实验结构, 设定光纤凹锥最短直径为 $40.60 \mu\text{m}$, 锥长为 $434.64 \mu\text{m}$. 两凹锥之间的距离为 5 cm . 利用BPM对相同结构参数下的DOT-d和双凹锥结构(Dual down-taper, DDT)进行分析比较. 图5(a)、5(b)分别表示DOT、DDT结构中传输光场的归一化值. 经对比分析可知: 入射光能量被严格地限制在导入SMF的纤芯中, 当进入到一级锥区后, 纤芯中的光能量被扩散到包层中, 由于光能量的叠加或减弱而导致其分布不均匀. 当入射光能量进入到二级锥区后, 包层中的部分光能量会耦合回纤芯中, 即发生纤芯与包层光能量的交互传递. 对于DOT-d结构, 凹锥中部的球状纤芯会在原凹锥分光比基础上进一步将包层中光能量耦合回纤芯区域, 光纤输出端处的纤芯能量和包层能量近似均等分布, 高于同参量下的DDT结构. 因此相比于DDT结构在增加了干涉条纹ER的同时减少了透射损耗. 在实验中按照DOT-d的结构参数制作DDT结构, 两种结构的光学显微图如图5(c)所示, DDT结构中的锥区最短处直径为 $40.54 \mu\text{m}$, 锥长为 $430.28 \mu\text{m}$. 两种结构所对应的透射光谱如图5(d)所示, DDT结构的最大ER为10.05 dB低于DOT-d结构, 并且有较大的传输损耗, 实验结果与模拟结果相吻合. 基于上述实验分析, 选用DOT-d-结构进行应变、温

度传感测试.

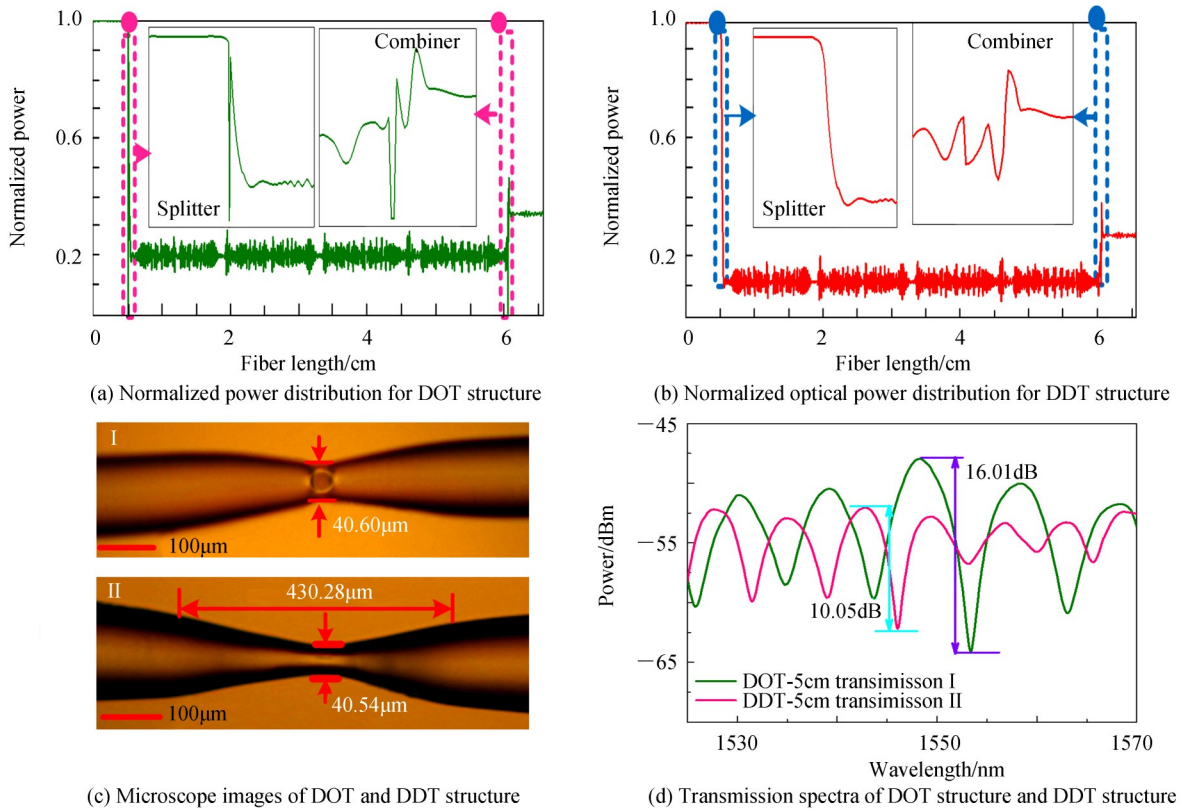


图5 DOT结构与DDT结构对比分析

Fig.5 Comparative analysis of DOT structure and DDT structure

2.2 传感实验分析

实验在室温(25°C)下进行,应变、温度测量的实验装置如图6所示.传感系统由平坦化宽带光源(BBS, 输出光功率 120 mW, 带宽 1 525~1 565 nm), 偏振控制器(PC), SMF 跳线和光谱分析仪(OSA, Agilent 86142B, 分辨率:0.06 nm/0.01 dB)组成.将DOT传感结构(一级锥区最短处直径为 40.60 μm, 锥长为 434.64 μm, 锥度分别为 168.14°和 168.22°;二级锥区最短处直径为 39.98 μm, 锥长为 429.64 μm, 锥度分别为 168.02°和 167.66°)用AB树脂胶水平固定于悬臂梁上,两个固定点之间的距离为 $L_1=19.5$ cm, 梁的厚度 $h=0.3$ cm. 用机械夹具将悬臂梁的一端固定,其余部分悬空,固定点与机械夹具之间的最短距离 $x_0=1.2$ cm. 利用分辨率为 0.01 mm 的精密位移平台并通过接触销以 $f=0.1$ mm 的位移增量在自由端施加轴向应力,来自 DOT 传感

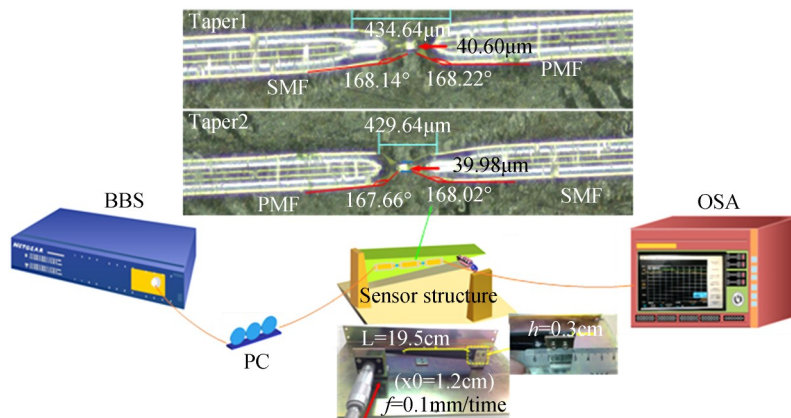


图6 应变传感实验装置

Fig.6 The strain sensing experiment set up

结构的应变信号被 OSA 密切监控,通过式(5)转化成应变值^[25].使用分辨率为±0.2℃的温控箱(TC, LI-CHEN, 202-00T, 中国)来表征温度.

$$\epsilon = \frac{3 \cdot (L_1 - x_0) \cdot h \cdot f}{(2L_1)^3} \quad (5)$$

在 0~244.35 με 范围内以 11.106 με 为测试步长对 DOT 结构进行轴向应变测试,分别对传感结构施加正应变和逆应变以检测结构的重复性,应变响应光谱如图 7 所示.选择透射光谱中 dip4 和 dip5 作为监测波谷,如图 7(a)所示为 dip4 所对应透射光谱的应变响应及应变灵敏度分析图,当应变增加时,dip4 所对应的光谱在波长域内发生明显地蓝移.在 0~55.53 με 范围内的应变灵敏度 $K_1=7.14 \text{ pm}/\mu\epsilon$;在 55.53~244.35 με 范围内的应变灵敏度 $K_2=20.09 \text{ pm}/\mu\epsilon$.执行相反的测量顺序时,dip4 所对应的特征波长发生红移,在 244.35~55.53 με 范围内,灵敏度 $K_2'=20.07 \text{ pm}/\mu\epsilon$.在 55.53~0 με 范围内的灵敏度 $K_1'=6.84 \text{ pm}/\mu\epsilon$.图 7(b)表示 dip5 所对应透射光谱的应变响应及应变灵敏度分析图,应变增加/减小时,dip5 所对应的光谱在波长域内相应地发生蓝移/红移.经线性拟合分析后,应变在 0~55.53 με 范围内增加时,应变灵敏度 $K_3=8.45 \text{ pm}/\mu\epsilon$.在 55.53~244.35 με 范围内增加时,应变灵敏度 $K_4=37.13 \text{ pm}/\mu\epsilon$.当应变在 244.35~55.53 με 和 55.53~0 με 范围内逐渐减小时,应变灵敏度分别为 $K_3'=9.28 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $K_4'=36.97 \text{ pm}/\mu\epsilon$.综合上述分析可知该结构在应变传感测试中具有良好的重复性,约 99.36%.当 $\epsilon > 55.53 \mu\epsilon$ 时,在轴向应力的挤压作用下会导致多个包层偏振模式与纤芯模耦合,依据式(3)可知应变灵敏度会有所差异.

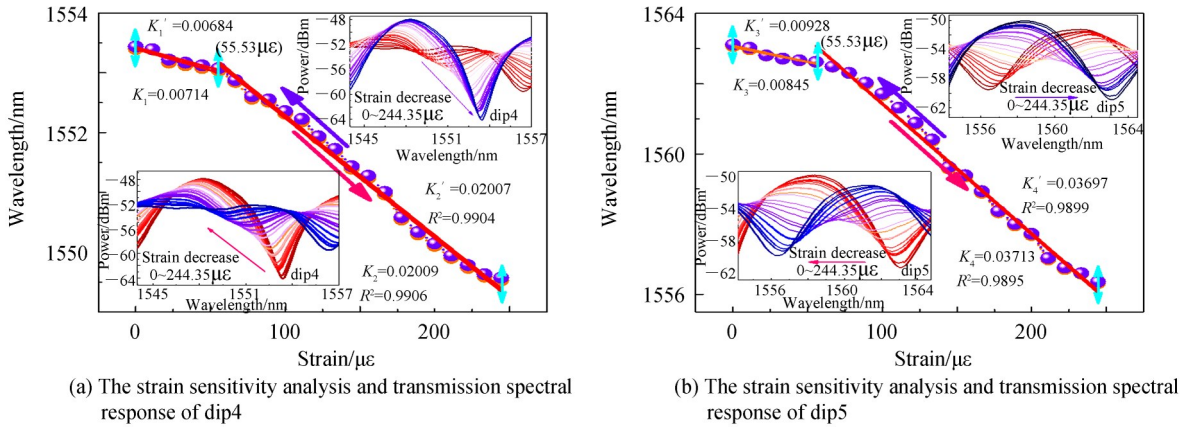


图 7 优化双凹锥结构的应变响应
Fig.7 The strain response of DOT structure

通过 TC 控制环境温度从 25℃以 5℃为步幅增加到 50℃,监测光谱的移动以实现 DOT 结构的温度传感.如图 8(a)所示为 dip4 所对应透射光谱的温度响应及温敏度分析图,透射光谱随温度升高而发生相应地红移,其所对应的温度灵敏度 $K_1=75.34 \text{ pm}/\text{C}$.图 8(b)为 dip5 所对应透射光谱的温度响应及温敏度分析图,其所对应的温度灵敏度 $K_2=65.37 \text{ pm}/\text{C}$.综合以上应变、温度测量结果,由于在 55.53~244.35 με 范围内,该结构存在较高的应变灵敏度和线性度,将上述实验结果表示为: $K_{\lambda_4, \epsilon} = -20.09 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $K_{\lambda_5, \epsilon} = -37.13 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $K_{\lambda_4, T} = 75.34 \text{ pm}/\text{C}$, $K_{\lambda_5, T} = 65.37 \text{ pm}/\text{C}$.

对于应变、温度同步测量传感结构,可用灵敏度矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{\lambda_5, \epsilon} & -K_{\lambda_4, \epsilon} \\ -K_{\lambda_5, T} & K_{\lambda_4, T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_4 \\ \Delta \lambda_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $D = K_{\lambda_4, T} K_{\lambda_5, \epsilon} - K_{\lambda_4, \epsilon} K_{\lambda_5, T}$,将实验结果代入式(6)可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{-1489.9742} \begin{bmatrix} -37.13 & 20.09 \\ -65.37 & 75.34 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_4 \\ \Delta \lambda_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\Delta \epsilon$ 和 ΔT 的相对测量误差可以表示为^[26]

$$\left| \frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T} \right| = \frac{|K_{\lambda_4, \epsilon} K_{\lambda_5, \epsilon, T} - K_{\lambda_5, \epsilon} K_{\lambda_4, \epsilon, T}|}{|K_{\lambda_4, T} K_{\lambda_5, \epsilon} - K_{\lambda_4, \epsilon} K_{\lambda_5, T}|} \Delta \epsilon \quad (8)$$

$$\left| \frac{\delta(\Delta \epsilon)}{\Delta \epsilon} \right| = \frac{|K_{\lambda_4, T} K_{\lambda_5, \epsilon, T} - K_{\lambda_5, T} K_{\lambda_4, \epsilon, T}|}{|K_{\lambda_4, T} K_{\lambda_5, \epsilon} - K_{\lambda_4, \epsilon} K_{\lambda_5, T}|} \Delta T \quad (9)$$

式中, $K_{\lambda_{dip}, \epsilon, T} = \frac{K_{\lambda_{dip}, \epsilon} K_{\lambda_{dip}, T}}{\lambda_{dip}} - 2\lambda_{dip} \alpha P_e$ 表示交叉敏感系数. 式中 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $P_e = 0.218$. 当 $\epsilon = 55.53 \mu\epsilon$ 时, $\lambda_{dip4} = 1553.035 \text{ nm}$, $\lambda_{dip5} = 1562.620 \text{ nm}$. 经计算可得温度和应变的相对误差分别为 $6.61 \times 10^{-8} \times \Delta \epsilon / ^\circ\text{C}$ 和 $4.07 \times 10^{-8} \times \Delta T / \mu\epsilon$. 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内, 应变测量的最大相对误差为 $1.0175 \times 10^{-4} \%$. 当 $\Delta \epsilon = 244.35 \mu\epsilon$ 时, 温度测量的最大相对误差小于 $9.9715 \times 10^{-4} \%$. 所以应变和温度之间的交叉串扰对于传感测量的误差影响较小, 该结构可以可靠地实现双参量同步测量. 实验结果表明本文所设计的传感结构在灵敏度上高于文献[20]、[22]和[23]中的应变、温度同步传感器, 因此本文所涉及的结构可以适用于小范围的高精度应变、温度传感测量.

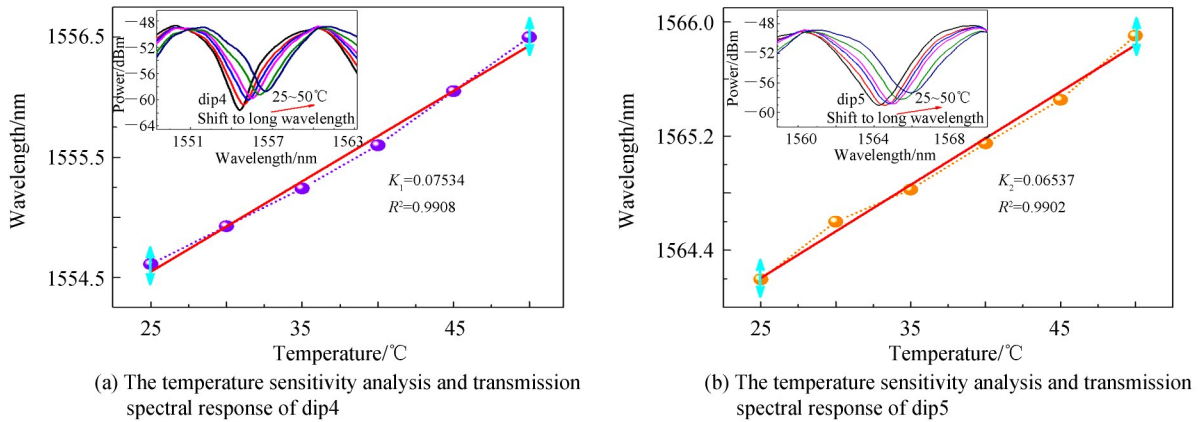


图8 优化双凹锥结构的温度响应
Fig.8 The temperature response of DOT structure

3 结论

本文设计了一种基于MZI原理的DOT传感器. 该结构通过SMF和PMF之间的不充分电弧熔接制备而成. 与传统双凹锥结构相比, 在增加了干涉条纹可见度的同时减少了传输损耗. 依据理论模拟而优化参数后的结构可以实现温度和应变的同步传感测量, 实验结果表明: 该传感器具有 $37.13 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $75.34 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的灵敏度. 应变和温度的测量分辨率分别为 $\pm 1.616 \mu\epsilon$ 和 $\pm 0.79 \text{ }^\circ\text{C}$, 高于多数普通或改进的光学应变、温度同步传感器. 由交叉敏感因素所引起的应变和温度测量的相对误差均小于 $1 \times 10^{-3} \%$. 这种具有高灵敏度、低串扰的传感器在桥梁健康监测、建筑表面温度形变、钢轨温度应力在线监测等精密工程领域中具有一定的应用价值.

参考文献

- [1] GAO Xue-kai, NING Ti-gang, ZHANG Chun-biao, *et al.* A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing[J]. *Optics Communications*, 2020, **454**: 124441-124446.
- [2] JUNG J, NAM H, LEE B, *et al.* Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(13): 2752-2754.
- [3] WANG Ying, LI Yu-hua, LIAO Chang-rui, *et al.* High-temperature sensing using miniaturized fiber in-line Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **22**(1): 39-41.
- [4] SHAO Lai-peng, HU Jun-hui, LU Hang-lin, *et al.* High-sensitivity temperature sensor based on polarization maintaining fiber Sagnac loop[J]. *Photonic Sensors*, 2019, **9**(1): 25-32.
- [5] GENG You-fu, LI Xue-jin, TAN Xiao-ling, *et al.* High-sensitivity Mach-Zehnder interferometric temperature fiber sensor based on a waist-enlarged fusion bitaper[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(11): 2891-2894.

- [6] XIA Feng, HU Hai-feng, ZHAO Yong. Highly-sensitive phase-interrogated RI sensor based on twin-core fiber with inherent noise suppression[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, **120**: 66-70.
- [7] LI Xiu-yan, WANG Xiao, NIU Pan-pan, *et al.* Refractive index measurement using OTDR-based ring-down technique with S fiber taper[J]. *Optics Communications*, 2019, **446**: 186-190.
- [8] XING Rui, WANG Zi-xiao, GAO Yi-xiao, *et al.* RI ring laser sensor based on concatenating CLF and SMF with one core-offset joint[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(11): 1225-1228.
- [9] WU D K, KUHLMEY B T, EGGLETON B J. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(3): 322-324.
- [10] DENG Ming, ZHU Tao, RAO Yun-jiang, *et al.* Miniaturized fiber-optic Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[C]. 2008 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference, IEEE, 2008: 1-4.
- [11] LI Ben-ye, JIANG Lan, WANG Su-mei, *et al.* A new Mach-Zehnder interferometer in a thinned-cladding fiber fabricated by electric arc for high sensitivity refractive index sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(6): 829-832.
- [12] PENG Zhi-qing, FENG Wen-lin, YANG Xiao-zhan, *et al.* Graphene-based waist-enlarged optical fibre sensor for measurement of sucrose concentration[J]. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 2019, **74**(9): 751-756.
- [13] FENG Wen-bin, GU Zheng-tian. A liquid level sensor based on long-period fiber grating with superimposed dual-peak [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(14): 1147-1150.
- [14] XuBEN, LI Jian-qing, LI Yi, *et al.* A thin-core fiber modal interferometer for liquid-level sensing[J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, **29**(10): 104209-104214.
- [15] LIAO Chang-ru, WANG D N, WANG Ying. Microfiber in-line Mach-Zehnder interferometer for strain sensing[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(5): 757-759.
- [16] GONG Hua-ping, WANG D.N, XIONG Meng-ling, *et al.* Optical fiber hollow ellipsoid for directional bend sensing with a large bending range[J]. *Optical Materials Express*, 2017, **7**(6): 1767-1776.
- [17] DING Lei, LI Yu, ZHOU Cai, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on three-core fiber for measurement of directional bending[J]. *Sensors*, 2019, **19**(1): 205-215.
- [18] DONG Shan-dong, DONG Bo, YU Chuang-yuan, *et al.* Cascaded fiber up-taper modal interferometer and its application as fiber sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **37**(11): 2675-2680.
- [19] KANG Ze-xin, WEN Xiao-dong, LI Chao, *et al.* Up-taper-based Mach-Zehnder interferometer for temperature and strain simultaneous measurement[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(12): 2691-2695.
- [20] XING Rui, DONG Chang-bin, WANG Zi-xiao, *et al.* Simultaneous strain and temperature sensor based on polarization maintaining fiber and multimode fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, **102**: 17-21.
- [21] SU Dan, QIAO Xue-guang, CHEN Feng-yi, *et al.* Compact dual fiber Bragg gratings for simultaneous strain and high-temperature measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **19**(14): 5660-5664.
- [22] HUANG Bing-sen, XIONG Song-song, CHEN Zhen-shi, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer exploiting a micro-cavity for strain and temperature simultaneous measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **19**(14): 5632-5638.
- [23] ZHENG Jia-rong, YAN Pei-guang, YU Yong-qin, *et al.* Temperature and index insensitive strain sensor based on a photonic crystal fiber in line Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2013, **297**: 7-11.
- [24] LI Chao, NING Ti-gang, LI Jing, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index, strain, and temperature based on a four-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, **90**: 179-184.
- [25] SUN Xiao, DU Yang, LIAO Wen-yu, *et al.* Measuring the heterogeneity of cement paste by truly distributed optical fiber sensors[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, **225**: 765-771.
- [26] JIN Wei, MICHIE W C, THURSBY G, *et al.* Simultaneous measurement of strain and temperature: error analysis[J]. *Optical Engineering*, 1997, **36**: 598-609.