

锥形三包层石英特种光纤折射率与温度传感器

付兴虎^{1,2} 杨传庆¹ 王思文¹ 谢海洋¹ 张顺杨¹ 付广伟^{1,2} 毕卫红^{1,2}

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²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 提出了一种锥形三包层石英特种光纤(TTCQSF)的折射率与温度传感器。它是通过对2根单模光纤(SMF)之间熔接的三包层石英特种光纤(TCQSF)熔融拉锥得到的SMF-TTCQSF-SMF级联结构,形成了光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。由于TTCQSF纤芯模和包层模之间的光程差会随着外界环境的变化而改变,从而引起传感器干涉谱的变化,因此可以通过检测传感光谱的变化实现对外界物理量的测量。分别对该传感器进行折射率和温度传感实验,实验结果表明,当溶液折射率在1.3350~1.3466范围、温度在25.7℃~94.9℃范围内时,随着折射率和温度的增加,传感器的传输光谱分别出现红移和蓝移现象,其折射率灵敏度和温度灵敏度分别为1673.94 nm/RIU和-0.061 nm/℃,且均具有很好的线性度,其中RIU为单位折射率。该传感器制作简单、灵敏度高,在生物化学、工业生产的折射率和温度测量场合具有较好的应用前景。

关键词 光纤光学; 三包层石英特种光纤; 马赫-曾德尔干涉仪; 折射率; 温度

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1206003

Refractive Index and Temperature Sensor of Tapered Triple Cladding Quartz Specialty Fiber

Fu Xinghu^{1,2} Yang Chuanqing¹ Wang Siwen¹ Xie Haiyang¹ Zhang Shunyang¹

Fu Guangwei^{1,2} Bi Weihong^{1,2}

¹School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A refractive index and temperature sensor is proposed based on tapered triple cladding quartz specialty fiber (TTCQSF). The SMF-TTCQSF-SMF structure is fabricated by drawing a section of fused TCQSF which is spliced in the both ends with two single mode fibers (SMFs). Then an in-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) is achieved. The optical path difference between the fiber core mode and cladding mode of TTCQSF can vary with the changes of the external environment. And it causes the change of the sensor interference spectrum. Monitoring the variation of the transmission spectrum can determine the ambient physical parameters. The sensing performances of refractive index and temperature of the sensor are tested, respectively. The experimental results show that the transmission spectra of the sensor have red shift when the refractive index increases in the range from 1.3350 to 1.3466 and have blue shift when the temperature increases in the range from 25.7 °C to 94.9 °C. The refractive index sensitivity is 1673.94 nm/RIU and the temperature sensitivity is -0.061 nm/°C, where RIU is refractive index unit. Both of them have good linearities. The sensor has the advantages of easy manufacturing and high sensitivity. So it has a good application prospect in the fields of refractive index and temperature measurement, such as biochemistry and industrial production.

Key words fiber optics; triple cladding quartz specialty fiber; Mach-Zehnder interferometer; refractive index;

收稿日期: 2015-06-19; 收到修改稿日期: 2015-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(61205068,61475133)、河北省自然科学基金项目(F2015203270)、河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2014057)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划、燕山大学信息学院优秀青年基金(2014201)

作者简介: 付兴虎(1981—),男,博士,讲师,主要从事特种光纤传感方面的研究。E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

temperature

OCIS Codes 060.2310; 060.2370; 060.2400

1 引 言

光纤干涉仪是一种利用外界因素引起的光纤中光波相位变化来探测各种物理量的光纤传感器,具有体积小、抗电磁干扰、灵敏度高等优点^[1-4],可以非常简单快捷地对温度、折射率、压力及弯曲等外场的变化进行感应和测量^[5]。近年来,熔融拉锥法作为制备光纤传感器的重要方法之一^[6],得到了国内外研究人员的广泛关注。根据锥形光纤的表面倏逝场强烈的相互作用可以制备倏逝场或干涉型传感器^[7-8],实现对液体折射率^[9-11]、曲率^[12-13]、温度^[14-15]、湿度^[16-17]等参量的测量。此外,由于锥形光纤的尺寸较小,使得其表面强烈的倏逝场也更容易受到外界环境的影响,所以基于锥形光纤的传感器比常规光纤传感器具有更高的灵敏度,这也使得它在光纤传感领域具有更好的发展前景^[18]。

三包层石英特种光纤(Triple cladding quartz specialty fiber, TCQSF)是一种新型特种光纤,其特殊的三包层结构使其具有许多奇特的光学特性。本课题组前期已对未拉锥的三包层石英特种光纤传感特性做了初步研究^[19],发现其具有包层模谐振特性,且对折射率不敏感。因此,为了探索 TCQSF 的更多传感特性,本文从改变该光纤的外部结构入手,提出了一种锥形三包层石英特种光纤(Tapered TCQSF, TTCQSF)传感器,并对其温度与折射率的传感特性进行了深入研究。

2 理论分析

将一段 TCQSF 熔接在 2 段普通单模光纤(SMF)之间,并对中间的 TCQSF 进行熔融拉锥即可形成所提出的 SMF-TTCQSF-SMF 级联而成的“三明治”结构,其结构示意图如图 1 所示,图中标注 a、b、c、d 分别为 TTCQSF 的石英纤芯、掺氟内包层、环形空气孔层和石英外包层。

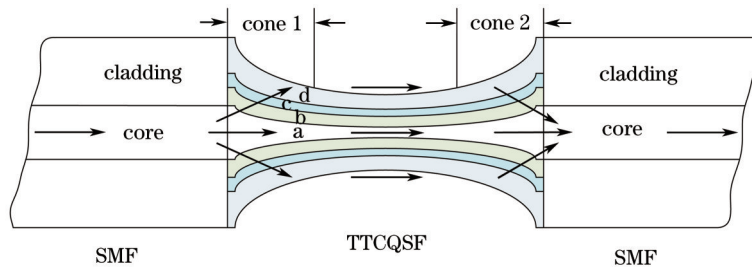


图 1 SMF-TTCQSF-SMF 结构图

Fig.1 Configuration of the SMF-TTCQSF-SMF

由图 1 可以看出,光源发出的光首先进入单模光纤,并以基模形式向前传输。当光传输至 TTCQSF 的第 1 个锥体时,随着光纤的半径逐渐变小,纤芯与掺氟内包层界面处的入射角逐渐变小,全反射条件改变,一部分光能量会耦合进掺氟内包层,并穿过空气孔层进入石英外包层,以包层模式向前传输;另一部分光留在纤芯里以纤芯模式继续向前传输。纤芯模和包层模具有不同的有效折射率,传输相同的距离后会产生光程差。当光传输至第 2 个锥体时,以包层模式传输的光将会重新耦合至纤芯,与原纤芯中传输的纤芯模发生干涉,形成了光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。拉锥后的 TTCQSF 锥腰很细,表面倏逝场强,对外界环境变化敏感,可用于传感测量。由双光束干涉理论可知,发生干涉后的光强与 m 级干涉条纹波峰(或波谷)对应的波长值为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (1)$$

$$\lambda_m = \frac{(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}})L}{m} = \frac{n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}L}{m}, \quad (2)$$

式中 I 为输出总光强; I_1 、 I_2 分别为传感区域纤芯和包层中的光强; φ 为两光束的相位差; λ_m 为 m 级干涉条纹波峰(或波谷)对应的波长值; $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 分别 TTCQSF 中传输的纤芯模式与包层模式的有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}} = n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 为二者的差值; L 为干涉长度,即 TTCQSF 锥区的长度。

由(2)式可知, λ_m 受到 $n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}$ 和 L 共同影响。外界环境折射率的变化会导致 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 发生变化, $n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}$ 也相应

发生改变,最终导致 λ_m 发生变化;由于物质的热光效应和热膨胀效应会导致材料的折射率发生变化,因此 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 会随着外界环境温度的改变而改变,若 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 变化量不同, $n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}$ 也会发生的相应改变,最终导致 λ_m 发生变化;同时,物质的热膨胀效应还会引起 TTCQSF 长度的改变,同样也会导致 λ_m 发生变化。外界环境变化引起 λ_m 的变化量可表示为

$$\Delta\lambda_m = \frac{(n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}} + \Delta n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}})(L + \Delta L)}{m} - \frac{n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}L}{m} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}L}{m} + \frac{n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}\Delta L}{m} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}\Delta L}{m}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda_m$ 为波长变化量; $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{core-clad}}$ 为锥区纤芯与包层有效折射率的差值变化量; ΔL 为锥区长度变化量。因此,将此传感器置于不同外界环境中,通过检测干涉条纹的波长变化量就可以实现折射率和温度的检测。

3 实验与结果分析

3.1 传感器的制作

实验中采用长飞光纤光缆有限公司生产的 TCQSF,石英外包层直径为 125 μm ,石英纤芯直径为 8.6 μm ,外包层与纤芯由同种材料构成,具有相同的折射率,紧挨着纤芯的掺氟内包层直径为 26.4 μm ,折射率比纤芯折射率小,在内包层和外包层之间有 1 圈呈圆形排列的空气孔,折射率比内包层折射率小,截面如图 2(a)所示。

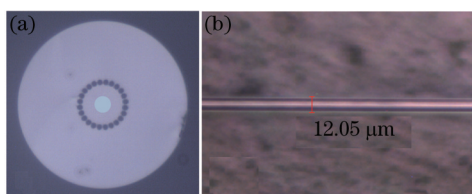


图 2 (a)TCQSF 截面图; (b) TTCQSF 电子显微镜照片

Fig.2 (a) Cross section of the TCQSF; (b) micrograph of the TTCQSF

该实验所选光纤拉锥机是 SCS-4000 型光纤熔融拉锥系统,其氢氧焰宽度为 15 mm;光源为上海飞秒光电有限公司生产的 ASE3700 型放大自发辐射(ASE)光源,波长范围为 1520~1610 nm,最大输出光功率为 40 mW;光谱仪为日本横河 AQ6375 型光谱分析仪(OSA)。

在传感器的制备过程中,首先将 1 段剥去涂覆层、长度为 20 mm 的洁净 TCQSF 熔接在 2 段普通单模光纤之间;然后将其水平放置在光纤拉锥机上,并使中间段 TCQSF 处在 2 个光纤夹具的中间位置;最后分别对氢气流量与拉锥速度进行设置,点燃氢氧焰后盖上防风罩,待氢氧焰稳定后进行拉锥。在拉锥过程的前半部分, TTCQSF 的纤芯及各个包层按等比例缩小;随着拉锥长度的增加,锥区越来越细,火焰的持续加热使 TTCQSF 的温度逐渐升高,空气孔塌陷,致使拉锥前后光纤横截面发生变化。由于不同拉锥长度激发出的模式不同,与基模发生干涉的高阶模也不一样,对外界参量的敏感程度也会有所差别,所以这一变化会对光纤的传输性能造成影响。当拉锥长度为 18.39 mm 时,通过光谱仪发现,在 1520~1610 nm 光谱范围内,会出现比较规整的、具有周期性的干涉光谱。拉锥后 TTCQSF 锥区中间段在电子显微镜下的照片如图 2(b)所示,此时最细处的直径为 12.05 μm ,极易受到弯曲和应力等其他外界参量的影响,所以在进行折射率与温度实验之前,应将制作好的传感头固定在洁净的载玻片上,使整个传感头处于拉直状态,保持恒定的拉力不变。

3.2 折射率传感实验

在折射率传感实验中,配置了 8 组不同质量浓度(10~80 mg/mL)的 NaCl 溶液,并用阿贝折射仪对溶液折射率进行测量,测得折射率变化范围为 1.3350~1.3466。折射率传感实验系统如图 3 所示。



图 3 折射率传感实验系统

Fig.3 Schematic system of refractive index sensing experiment

如图3所示,将制作好的传感器两端分别接在宽带光源和光谱仪上,传感头水平浸没在盛有NaCl溶液玻璃皿中,通过光谱仪观察透射光谱的变化,并记录下实验数据。如此反复进行,记录在不同浓度NaCl溶液中的实验数据。每次测量之后用蒸馏水多次清洗传感头,为下次测量做好准备。实验测得在不同浓度NaCl溶液中传感器传输光谱如图4所示,图中箭头指示为某一特定波峰在不同折射率时所处位置。

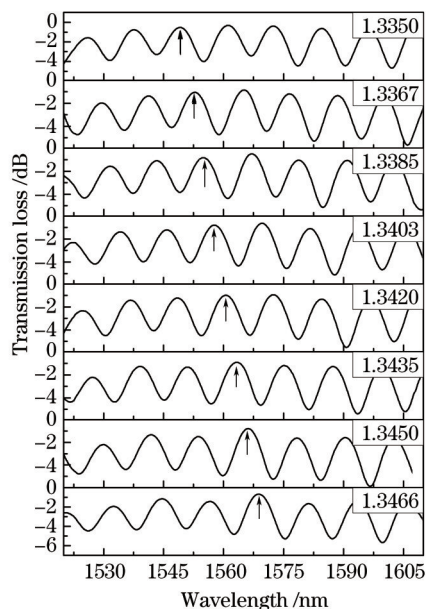


图4 传感器在不同浓度NaCl溶液中的传输光谱

Fig.4 Transmission spectra of the sensor in NaCl solutions with different concentrations

由图4可见,随着NaCl溶液浓度的增大,该传感器的传输光谱向长波方向漂移,即发生红移现象。这是因为拉锥后的TTCQSF锥腰很细,激发的包层模模式较高,则随着外界折射率的增加,纤芯模和包层模的有效折射率差 $n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 增大,由(2)式可知此时传输光谱会向长波方向漂移。对该1560 nm附近波峰的漂移量与NaCl溶液折射率变化量之间的关系进行计算分析,可得波长漂移与折射率变化之间的关系如图5所示。

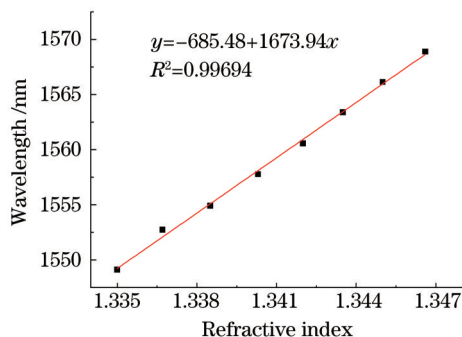


图5 波长漂移与折射率的关系

Fig.5 Relationship between wavelength shift and refractive index

由图5可知,该传感器对折射率非常敏感,其灵敏度为1673.94 nm/RIU,且波长漂移与折射率的变化具有很好的线性关系,其中RIU为单位折射率。

3.3 温度传感实验

在温度传感实验中,采用控温精度为0.1 °C的温控箱作为温度实验装置,通过对温控箱预设不同的温度值,实现对不同温度的测量。实验原理图如图6所示。

如图6所示,将测量完NaCl溶液折射率的传感头用蒸馏水多次清洗并擦拭干净后水平放置于温控箱中,两端分别接在ASE光源和光谱仪上,调节温控箱使其设定在某一特定温度,待温度稳定20 min后,观察光谱仪上传输光谱的变化,并记录实验数据。如此反复进行,记录25.7 °C~94.9 °C温度范围内不同温度下的实验数据。实验测得不同温度下传感器传输光谱如图7所示。

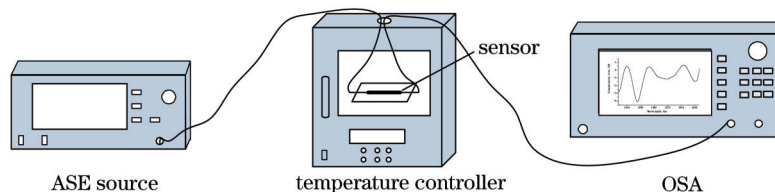


图6 温度传感实验系统

Fig.6 Schematic system of temperature sensing experiment

由图7可见,随着温度的升高,传感器传输光谱向短波方向漂移。为了进一步考察传感器传输光谱变化与温度的关系,选取波长1566 nm附近的波谷作为观测点进行分析,得到传输光谱随温度变化的具体情况如图8所示。

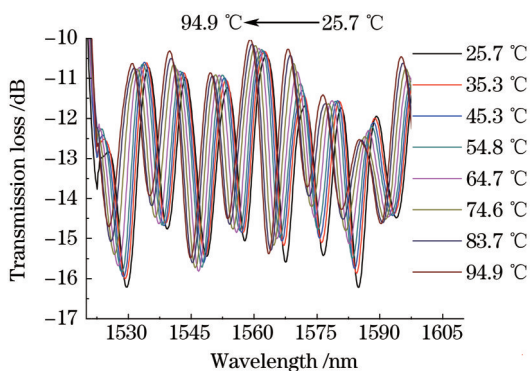


图7 传感器在不同温度下的传输光谱
Fig.7 Transmission spectra of the sensor in different temperatures

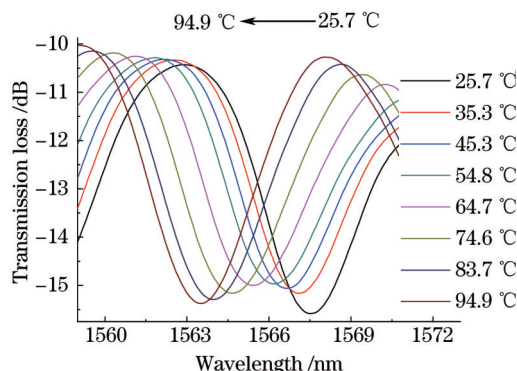


图8 1566 nm附近不同温度所对应传输光谱
Fig.8 Transmission spectra near 1566 nm with different temperatures

由图8可见,随着温度的升高,传感器传输光谱出现蓝移现象。这主要是由于物质的热光效应和热膨胀效应使材料的折射率发生了变化。TCQSF中,掺氟内包层由于氟的掺入,其热光系数及热膨胀系数均低于纤芯与石英外包层。因此,拉锥过程中随着光纤结构的不断变化及不同材料之间的熔合,内嵌于该包层且结构尺寸较小的纤芯更易受其影响,使得纤芯热光系数及热膨胀系数均具有一定程度的降低,从而随着外界温度的升高, n_{eff}^{core} 与 n_{eff}^{clad} 同时增大,但前者的变化量小于后者,导致 $n_{eff}^{core-clad}$ 减小,由(2)式可知此时干涉峰会向短波方向漂移。对该段传输光谱的漂移量与温度的变化量进行计算分析,可得波长漂移与温度变化之间的关系如图9所示。

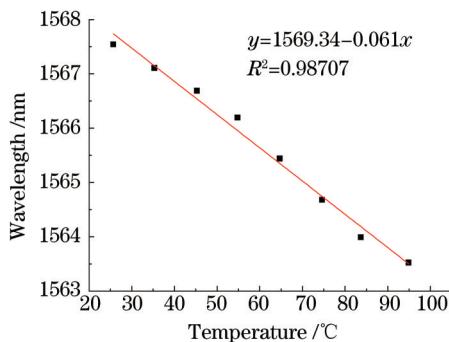


图9 波长漂移与温度的关系

Fig.9 Relationship between wavelength shift and temperature

由图9可知,该传感器的温度灵敏度为 $-0.061 \text{ nm}/\text{°C}$,且波长漂移与温度的变化具有较好的线性关系。

将该传感器与在两段标准单模光纤之间熔接一段光子晶体光纤(PCF)、多模光纤(MMF)、无芯光纤(NCF)、细芯光纤(TCF)、熔锥光纤(Tapered-fiber)等制作而成的传感器进行比较,其结果如表1所示。

表 1 采用不同类型光纤的传感器折射率与温度灵敏度

Table 1 Refractive indexes and temperature sensitivities of sensors with different fiber types

| Fiber type | Refractive index sensitivity /(nm/RIU) | Fiber type | Temperature sensitivity /(pm/°C) |
|-------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| TTCQSF | 1673.9 | TTCQSF | 61 |
| PCF ^[20] | 198.77 | Dual-core PCF ^[21] | 20.7 |
| MMF ^[22] | 152.237 | Graded-index MMF ^[23] | 58.5 |
| NCF ^[24] | 205.42 | MMF-TCF ^[25] | 54.2 |
| Tapered-fiber ^[26] | 1500 | Tapered-fiber ^[27] | 10 |

由表 1 可知,采用拉锥的三层石英特种光纤制备的传感器具有更高的灵敏度,其折射率和温度灵敏度分别为 1673.94 nm/RIU 和 -0.061 nm/°C。

为了解决 TTCQSF 传感器的折射率与温度交叉敏感问题,将该传感器与光纤布拉格光栅(FBG)级联。由 FBG 的带通滤波特性^[28]可知,级联后的传输光谱中会在 FBG 中心波长处出现一个带宽较窄的损耗峰。将该级联后的传感器应用于折射率和温度测量中,根据双参量矩阵运算法^[29-30]可构建矩阵:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{m1} \\ \Delta\lambda_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\Delta\lambda_{m1}$ 与 $\Delta\lambda_{m2}$ 分别为 FBG 中心波长与 1566 nm 附近观测点的波长漂移量; A 、 B 分别为 FBG 折射率与温度灵敏度, C 、 D 分别为观测点的折射率与温度灵敏度; Δn 和 ΔT 分别为外界环境折射率与温度的变化量。因此,通过测量 FBG 中心波长与观测点的波长漂移量,便能获得相应的外界折射率与温度的变化量,从而实现二者的同时测量。

4 结 论

本文提出了一种 SMF-TTCQSF-SMF 结构的 MZI 传感器,它是将一段 TCQSF 熔接在 2 段 SMF 之间,并对 TCQSF 熔融拉锥而制得。介绍了该传感器的制作方法,并通过液体折射率与温度传感实验对其传感特性进行了研究。实验结果表明,当溶液折射率在 1.3350~1.3466 范围、温度在 25.7 °C~94.9 °C 范围内时,随着折射率和温度的增加,传感器的传输光谱分别出现红移和蓝移现象,其折射率灵敏度和温度灵敏度分别为 1673.94 nm/RIU 和 -0.061 nm/°C,且均具有很好的线性度。该传感器制作简单、结构紧凑,可用于生物化学、工业生产领域中的折射率和温度测量。

参 考 文 献

- 1 Shen Changyu, Zhong Chuan, You Yang, *et al.*. Polarization-dependent curvature sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer with a difference arithmetic demodulation method[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15406-15417.
- 2 Shu Zhuo, Tong Bin, Xu Chunhui, *et al.*. Dual-fiber Fabry-Perot displacement sensor based on ratio method fringe counting demodulation [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1005003.
舒 卓,童 斌,徐春晖,等.基于双路比值条纹计数法的法布里-珀罗腔位移传感器[J].*中国激光*, 2013, 40(10): 1005003.
- 3 Yang Kai, Xu Ben, Li Yi, *et al.*. Highly sensitive temperature fiber sensor based on liquid-sealed Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(7):1259-1264.
杨 凯,徐 贲,李 裔,等.高灵敏度液封光纤马赫-曾德干涉仪温度传感器[J].*光电子·激光*, 2014, 25(7): 1259-1264.
- 4 Zhao Enming, Yuan Libo, Tian Fengjun, *et al.*. Preparation and birefringence properties of the embedded multi-core hollow fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0206006.
赵恩铭,苑立波,田凤军,等.熔嵌式多芯中空光纤制备方法及其双折射特性[J].*光学学报*, 2013, 33(2): 0206006.
- 5 Fang Shuiping. Research and design of a new fused M-Z fiber interferometer[J]. *Optical Communication Technique*, 2014, 38(7): 26-28.
方水平.新型熔锥型 M-Z 光纤干涉仪的研究与设计[J].*光通信技术*, 2014, 38(7): 26-28.
- 6 Zhang Weihua, Ying Zesheng, Yuan Shuo, *et al.*. A fiber laser sensor for liquid level and temperature based on two taper structures and fiber Bragg grating[J]. *Opt Commun*, 2015, 342: 243-246.
- 7 Lou Jun, Xu Hongzhi, Huang Jie, *et al.*. Novel segmented structure optic fiber evanescent wave sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105006.

- 楼俊, 许宏志, 黄杰, 等. 新型的分段结构光纤倏逝波传感器[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105006.
- 8 Li Benye, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. High sensitivity Mach-Zehnder interferometer sensors based on concatenated ultra-abrupt tapers on thinned fibers[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(3): 640-645.
- 9 Silveira C R D, Jorge P. Bent optical fiber taper for refractive index measurements with tunable sensitivity[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015, 57(4): 921-924.
- 10 Xiong Yikun, Huang Xuguang. Optical fiber sensor for liquid refractive index based on fiber optic taper[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1956-1960.
熊贻坤, 黄旭光. 基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1956-1960.
- 11 Zhou Yingwu. Experimentally study on high-sensitivity fiber-optic refractometers based on Mach-Zehnder interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 841-844.
周赢武. 基于光纤 M-Z 干涉的高灵敏度液体折射率传感器的实验研究[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 841-844.
- 12 Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zhu Hongbin, *et al.*. Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506002.
付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506002.
- 13 Niu Luo, Zhao Chunliu, Gong Huaping, *et al.*. Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber[J]. Opt Commun, 2014, 333: 11-15.
- 14 Yang Rui, Yu Yongsan, Xue Yang, *et al.*. A highly sensitive temperature sensor based on a liquid-sealed S-tapered fiber[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(9): 829-832.
- 15 Fu Haiwei, Xu Shichao, Qiao Xueguang, *et al.*. Coated and tapered fiber transmission characteristics based on temperature variation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305001.
傅海威, 许士超, 乔学光, 等. 基于温度变化的涂覆型熔锥光纤传输特性[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305001.
- 16 Pang Fufei, Xu Ping, Guo Hairun, *et al.*. Research on fiber evanescent coupling relative humidity sensor[J]. Optical Communication Technique, 2008, 32(3): 26-28.
庞拂飞, 徐平, 郭海润, 等. 光纤渐逝波耦合湿度传感器研究[J]. 光通信技术, 2008, 32(3): 26-28.
- 17 Harith Z, Irawati N, Ahmad Rafea H, *et al.*. Tapered plastic optical fiber coated with Al-doped ZnO nanostructures for detecting relative humidity[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 845-849.
- 18 Ni Kai, Chan Chi Chiu, Dong Xinyong, *et al.*. Temperature-independent accelerometer using a fiber Bragg grating incorporating a biconical taper[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 410-413.
- 19 Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zeng Xianglong, *et al.*. Refractive index insensitive temperature sensor based on specialty triple-clad fiber[J]. Opt Express, 2015, 23(3): 2320-2327.
- 20 Tang Changping, Deng Ming, Zhu Tao, *et al.*. Photonic crystal fiber based M-Z interferometer for refractive index measurement[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(9): 1304-1308.
唐昌平, 邓明, 朱涛, 等. 基于光子晶体光纤 M-Z 干涉仪的折射率传感器研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(9): 1304-1308.
- 21 Chen Daru, Hu Gufeng, Chen Lingxia. Pressure/temperature sensor based on a dual-core photonic crystal fiber[C]. SPIE, 2011, 8307(1): 1-10.
- 22 An Jiali, Jin Yongxing, Sun Mingming, *et al.*. Refractive index sensor based on waist-enlarged tapers and singlemode-multimode-singlemode fiber structure[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s105013.
安佳丽, 金永兴, 孙明明, 等. 基于腰椎放大单模-多模-单模光纤结构的折射率传感器[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s105013.
- 23 Liu Yu, Wei Li. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers[J]. Appl Opt, 2007, 46(13): 2516-2519.
- 24 Li Yang, Liu Yan, Liu Zhibo, *et al.*. A refractive index sensor based on single-mode no-core single-mode fiber structure[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(7): 1279-1285.
李阳, 刘艳, 刘志波, 等. 基于单模-无芯-单模结构的光纤折射率传感器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7): 1279-1285.
- 25 Fu Haiwei, Yan Xu, Li Huidong, *et al.*. Study of fiber sensor for simultaneous measurement of refractive and temperature based on a core-mismatch Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106001.
傅海威, 闫旭, 李辉栋, 等. 基于纤芯失配型马赫曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106001.
- 26 Yadav T K, Narayanaswamy R, Abu Bakar M H, *et al.*. Single mode tapered fiber-optic interferometer based refractive index sensor and

- its application to protein sensing[J]. *Opt Express*, 2014, 22(19): 22802.
- 27 Yang Shen, Sun Hao, Yuan Liutong, *et al.*. Refractive index and temperature sensor based on cladding-mode Bragg grating excited by abrupt taper interferometer[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(12): 120604.
- 28 Bi Weihong, Li Lin, Chen Jungang, *et al.*. Least narrow band spectrum properties of fiber Bragg grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(2): 212-215.
毕卫红, 李 林, 陈俊刚, 等. 极窄带宽的布拉格光纤光栅光谱特性研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(2): 212-215.
- 29 Li Lecheng, Xia Li, Xie Zhenhai, *et al.*. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using thinned fiber based Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(19): 3945-3949.
- 30 Lu Yanfang, Shen Changyu, Zhong Chuan, *et al.*. Refractive index and temperature sensor based on double-pass M-Z interferometer with an FBG[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26(11): 1124-1127.

栏目编辑: 王晓琰