

doi:10.3788/gzxb20154403.0328004

基于光纤锥级联结构的湿度传感器

张芸山¹, 乔学光^{1,2}, 邵敏¹, 傅海威¹, 李辉栋¹, 赵娜¹

(1 西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

(2 西北大学 物理系, 西安 710069)

摘 要: 提出了一种基于普通单模光纤粗锥级联结构的马赫-曾德尔干涉湿度传感器. 将两根单模光纤对芯熔融成一个粗锥, 并依次级联, 形成光纤锥-单模光纤-光纤锥-单模光纤-光纤锥结构. 外界环境湿度、温度的改变使传感器的纤芯基模和包层模的光程差发生改变, 引起传感器干涉光谱发生变化. 通过监测干涉谱波长和能量的变化实现对外界物理量的测量. 实验结果表明, 当空气中湿度在 35~95% RH 范围内变化时, 传感器的湿度灵敏度为 $-0.065 \text{ dB}/\% \text{ RH}$, 线性度为 0.997; 当温度在 30~80 °C 范围内变化时传感器的温度灵敏度为 $69.4 \text{ pm}/^\circ \text{C}$, 线性度为 0.998. 该传感器可以避免温湿度的交叉影响, 实现单参量的同时在线区分测量.

关键词: 光纤锥; 马赫-曾德尔干涉仪; 湿度传感器; 湿度灵敏度; 温度灵敏度; 交叉灵敏

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0328004-6

Humidity Sensor Based on Waist-enlarged Fiber Tapers Cascade Structure

ZHANG Yun-shan¹, QIAO Xue-guang^{1,2}, SHAO Min¹, FU Hai-wei¹, LI Hui-dong¹, ZHAO Na¹

(1 Ministry of Education Key Laboratory on Photoelectric Oil-gas Logging and Detecting, School of Science, Xi'an Shi you University, Xi'an, 710065, China)

(2 Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: An in-fiber Mach-Zehnder interferometer humidity sensor based on waist-enlarged fiber tapers cascade structure was proposed and demonstrated. The sensor head is formed by a taper-single-mode-taper-single-mode-taper structure through arc fusion splicing. The change of the humidity and temperature will make the optical path difference changed of the sensor core mode and cladding modes, causing interference spectral change. Through monitoring the spectra variation can determine the ambient physical quantities. The experimental results show that the humidity sensitivity of the sensor is $-0.065 \text{ dB}/\% \text{ RH}$ with a linearity of 0.997 in the humidity range of 35~95% RH; the temperature sensitivity of the sensor is $69.4 \text{ pm}/^\circ \text{C}$ with a linearity of 0.998 in the temperature range of 30~80 °C. This sensor can avoid the cross-sensitivity to humidity and temperature, make it a good candidate for high accuracy humidity and temperature applications.

Key words: Fiber tapers; Mach-Zehnder interferometer; Humidity sensor; Humidity sensitivity; Temperature sensitivity; Cross-sensitivity

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2430; 120.6780

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61327012, 61275088, 61077060)、教育部科技创新项目 (No. Z08119)、陕西省教育厅科研计划项目 (No. 14JK1580) 和陕西省教育厅重点实验室科研计划项目 (No. 12JS077) 资助

第一作者: 张芸山 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与地震检波的理论及实验. Email: 1121490150@qq.com

导师: 乔学光 (1955-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤光学、光纤传感、光纤通信及光电子学等. Email: xgqiao@nwu.edu.cn

收稿日期: 2014-09-10; **录用日期:** 2014-12-01

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

0 引言

环境相对湿度(Relative Humidity, RH)的测量及其控制在工农业生产、气象发电、航空航天、食品医疗、文物保护等领域非常重要,因此对湿度传感器的研究很有意义.相比传统的电类湿度传感器,光纤传感器不仅具有响应速度快、体积小、测量范围宽、防水、防火、耐腐蚀、抗电磁干扰等^[1-3]独特优势,而且可以实现非接触式无损检测及分布式测量,可以满足各种恶劣环境下的要求.目前对于各种光纤类湿度传感器的研究已有所报道,如光纤 F-P 腔类湿度传感器^[4-5],基于 Sagnac 干涉的光纤湿度传感器^[6],基于 FBG 的湿度传感器^[7],塑料光纤结构湿度传感器^[8]等. Chen^[9]等提出一种基于 F-P 腔干涉端面涂覆聚壳糖材料的湿度传感器,在 20%~95% 范围内灵敏度为 0.13nm/%RH,该传感器灵敏度较高,测量范围大,但对 F-P 腔长的控制技术要求较高,且涂层的厚度和均匀性难以控制. Jinesh^[10]等提出一种基于光子晶体光纤反射结构的湿度传感器,湿度测量范围为(40~95)%RH,线性度较差,灵敏度较低. Wu 等^[11]提出一种单模-细芯-单模光纤结构的湿度传感器,湿度在(80~83)%RH 及(83~95)%RH 范围内干涉谱波长漂移量较大,但测量范围受到限制. 张小康等^[12]提出一种双包层单模光纤传感结构,湿度在(30~100)%RH 范围内变化时其光强变化了 9dB. 上述传感器自身对于湿度并不敏感,需要涂覆吸湿材料增加其灵敏度,受到湿敏涂覆层厚度均匀性的限制,测量结果的稳定性和精确度较差,且未解决交叉敏感问题.

近年来将熔锥光纤器件应用于光纤传感领域已成为热点. Xu^[13]等提出单模-粗锥-光子晶体光纤-粗锥-单模结构应力传感器. Wu^[14]等提出光纤细锥级联型的马赫-曾德(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪温度传感器. Shao^[15]等提出一种单模-粗锥-单模-粗锥-单模光纤结构湿度传感器,湿度在(50~90)%RH 范围内,灵敏度为-0.047nm/%RH,灵敏度较高,但实验条件难以控制,测量范围受到限制,同时也未解决温湿度的交叉敏感问题. 本文提出并制作了粗锥级联 M-Z 型湿度传感器,传感器结构为光纤锥-单模光纤-光纤锥-单模光纤-光纤锥. 在没有涂覆吸湿增敏材料情况下,研究了传感器对外界环境空气中湿度和温度的光谱响应,实验结果表明该传感器灵敏度高、制作简单、结构紧凑、易封装、且能实现温湿度同时区分测量.

1 传感器的理论分析和结构设计

图 1 为传感器结构示意图. 该传感器是基于三个光纤粗锥级联的 Mach-Zehnder 干涉仪传感器结构,每两个粗锥形成一个 Mach-Zehnder 干涉仪传感器,粗锥

起到光纤耦合器的作用,粗锥之间的单模光纤充当传感臂功能. 在该结构中,从宽带光源发出的光在单模光纤中传输通过光纤粗锥时,一部分光进入到下一段单模光纤的纤芯,另一部分光会被耦合到单模光纤的包层中,激发包层中的高阶模产生. 在经过第二个粗锥时高阶模被耦合进下一段单模光纤,同时再次激发出包层中的高阶模产生,在第三个粗锥处,纤芯中的基模 LP₀₁ 模和包层中的高阶模 LP_{0m} 模被耦合进入下一段单模光纤的纤芯发生干涉,从而形成全光纤 M-Z 级联结构传感器.

传感器输出的光强表示为^[16]

$$I = I_{\text{core}} + \sum_m I_{\text{cladding}}^m + \sum_m 2\sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m} \cdot \cos\left(\frac{2\pi[n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}]}{\lambda} \cdot L\right) \quad (1)$$

式中 I 、 I_{core} 、 I_{cladding}^m 分别为干涉总光强、纤芯基模的光强和第 m 阶包层模的光强; $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 分别表示纤芯基模和第 m 阶包层模的有效折射率.

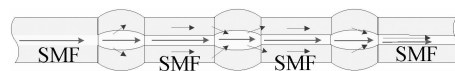


图 1 传感器的结构

Fig. 1 The structure of the sensor

当光通过传感器时,由于光纤纤芯和包层的折射率不同,经过传感器后纤芯和包层传播的两束光产生相位差,当干涉谱能量达到最小值时,则

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} = (2K+1)\pi \quad (2)$$

式中 K 是整数,两个干涉条纹之间的间隔表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta nL} \quad (3)$$

从式(3)可以看出两干涉条纹之间的间隔随着传感臂长度 L 的增大而减小.

当传感器外界的温度恒定而湿度发生变化时,对式(2)求导即可得到相对湿度灵敏度的计算公式为

$$\begin{aligned} \frac{dI}{d(\text{RH})} = & \frac{d\sum_m I_{\text{cladding}}^m(\text{RH})}{d(\text{RH})} + \\ & \sum_m [I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m(\text{RH})]^{-1/2} \times \frac{I_{\text{core}} dI_{\text{cladding}}^m(\text{RH})}{d(\text{RH})} \times \\ & \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}(\text{RH}) \cdot L]\right\} + \\ & \sum_m \sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m(\text{RH})} \times \\ & \sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(\text{RH}) \cdot L]\right\} \times \\ & \frac{4\pi}{\lambda} \cdot L \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(\text{RH})}{d(\text{RH})} \end{aligned} \quad (4)$$

随着环境中湿度逐渐增大,传感器外部折射率逐渐增大,包层有效折射率会增大,基于倏逝波原理向外辐射的能量会增多,导致包层模 I_{cladding}^m 减小,由于传感

器纤芯中传播的光强 I_{core} 不变,从而引起传感器透射谱总光强发生变化.通过监测光强的变化,可以检测出空气中湿度的大小.

当环境中湿度不变,温度改变会使传感器干涉谱发生变化,干涉谱波长的漂移量 $\Delta\lambda_m$ 表示为

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

从式(5)中可以看出干涉谱波长漂移量和传感臂的长度 L 及有效折射率差 Δn_{eff}^m 成正比,其中 L 是关于温度 T 的函数.随着外界环境中温度的升高,由于热胀冷缩的影响传感器的长度会增长,同时热光效应使传感器的有效折射率差 Δn_{eff}^m 增加,导致干涉光谱向长波方向发生漂移.通过监测传感器干涉谱的漂移量可以测出外界环境中温度变化.

MZI 的制作是使用普通商用光纤熔接机(古河 S177)熔接而成.四段单模光纤(长飞, $9 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$)用剥线钳去掉涂覆层后用蘸有酒精的棉花擦拭干净,为了得到较高的熔接质量,所有光纤端面用光纤切刀(古河, S325)切平整.将切好的光纤固定在熔接机夹具上,调节熔接参数进行放电熔接即可得到光纤锥.在不同的熔接参数下得到不同效果的粗锥,实验发现影响粗锥质量的主要原因是推进距离,推进量不同会造成干涉谱对比度较低或者干涉谱周期性较差.反复调节光纤推进量,找到最佳熔接参数为:首次放电强度 +150,首次放电结束强度 +100,清洁放电时间 +200 ms,预熔时间 +300 ms,再次放电时间 +1100 ms,Z 推进距离 +140 μm .光纤粗锥的形成是由于较高的放电强度和两个端面之间的重叠推进量导致,其大小可以在显微镜下观察,三个锥都是使用相同的方法制作.图 2 为使用该方法制作的光纤粗锥实物照片.光纤粗锥的长度约为 395~405 μm ,直径约为 170~175 μm ,光纤锥的直径大于单模光纤的直径(125 μm).实验中每两个粗锥之间的距离是 17 mm,传感器总长为 34 mm.

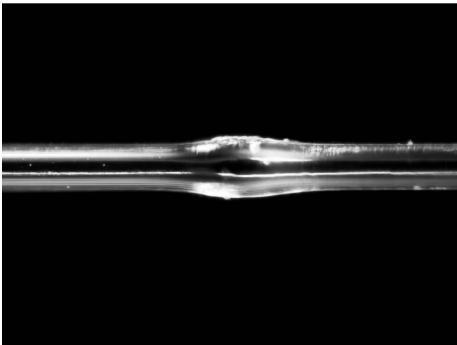


图 2 光纤粗锥

Fig. 2 The waist-enlarged fiber taper

图 3 为温度 22 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 24% RH 条件下,传感器在空气中的干涉光谱.从图中可以看出在 1 528 nm 到

1 608 nm 带宽为 80 nm 的范围内有明显的干涉条纹,条纹具有较好的周期性,且对比度较大可达 14 dB,满足实际的测量要求.

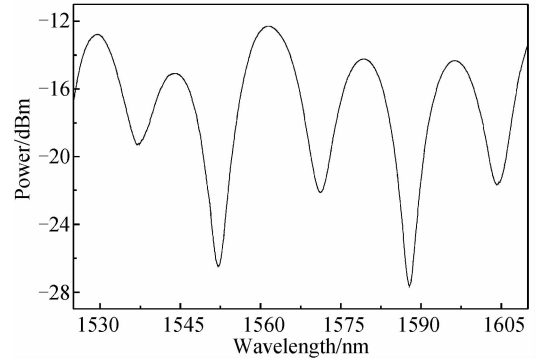


图 3 传感器在空气中的干涉光谱

Fig. 3 The interference spectra of the sensor in air

对传感器空气中的干涉谱做了傅里叶快速变换,得到相应的傅里叶频谱,如图 4.空间频率公式表示为^[17]

$$\nu = \frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda^2} \quad (6)$$

式中 L 表示传感臂的长度, Δn_{eff} 表示有效折射率差, ν 表示空间频率, λ 为监测干涉谱的中心波长.从式(6)可以看出当被测波长确定时,频率和传感器传感臂长度及有效折射率差成正比.从图 4 中可以看到,空间频率有一个非常明显的主峰值,对应的主值是 0.056 nm^{-1} .同时还存在一些较低的峰值,而且所对应的频率大于主峰所对应的频率,这说明在产生干涉的过程中传感器的干涉模式非常稳定.高阶包层模对应较高的有效折射率,即对应较高的空间频谱,因此对模间干涉起主要贡献作用的包层模为低阶模式,认为该传感器的干涉图样主要由一个激发的低阶包层模 LP_{0m} 模和基模 LP_{01} 模干涉形成.

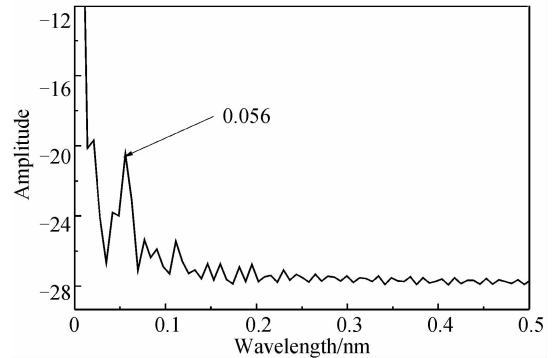


图 4 传感器在空气中的傅立叶频谱

Fig. 4 The spatial frequency spectra of the sensor in air

2 实验和结果分析

图 5 为湿度、温度实验装置图.传感器一端和宽带光源(BBS)连接,接收端与光谱分析仪(日本安利公司

MS9740A)连接,监测其透射光谱,其中光谱分析仪的最小分辨率为0.02 nm.在实验过程中,为了防止传感器弯曲和其它外界环境所带来的影响,将传感器拉直固定在载玻片上放入可程式恒温恒湿试验机中,试验机为东莞市伟煌实验设备有限公司生产的恒温恒湿试验机,设备型号是WH TH-225L-20-300,表1是试验机的相关参数.当试验机中温度恒定时,改变试验机中空气的湿度,传感器光纤表面会吸收水分子导致纤芯模和包层模的有效折射率差发生改变,干涉谱发生变化.

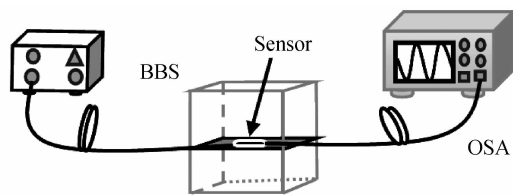


图5 湿度实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for humidity measurement

表1 可程式恒温恒湿试验机参数

Table 1 Programmable constant temperature and humidity testing machine parameters

Value	TR	HR	ATC	AHR
225L	-20~+150℃	20%~98%RH	±0.2℃, ±3%RH	±2℃, ±3%RH

备注:TR (temperature range), HR (humidity range), ACR (the accuracy of temperature control), AHR (the accuracy of humidity control)

图6是不同湿度条件下传感器的干涉图样.实验中选取中心波长为1571.37 nm的谐振波长作为监测波长.温度恒定在30℃,湿度在(35~95)%RH之间每隔10%RH改变一次湿度,不同线型表示不同湿度,记录监测谱所对应的波长和能量.从图中可以看出随着空气中湿度的增加,监测点能量逐渐减小,而波长的变化很小(有少量的蓝移),能量减少了4.01 dB,这是因为随着外界环境湿度的增加,包层有效折射率增加,由倏逝波向外辐射的能量也增加,故干涉谱的总能量减小,与理论分析一致.

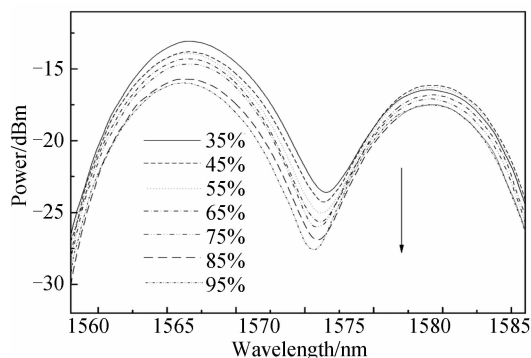


图6 传感器在不同湿度下的干涉光谱

Fig. 6 The interference spectra of the sensor under different humidity levels

图7是干涉谱能量和波长随湿度的变化规律.方框点和圆点是实验数据点,实线为线性拟合曲线.从图中可以看出,湿度从35%RH增加到95%RH的过程中,监测点能量逐渐减小,湿度对能量的响应灵敏度为-0.065dB/%RH,线性度为0.997.说明监测点能量的改变随着湿度的增加具有较高的线性度;波长改变了0.79 nm,其湿度关于波长的响应灵敏度为0.013nm/℃,线性度为0.933.

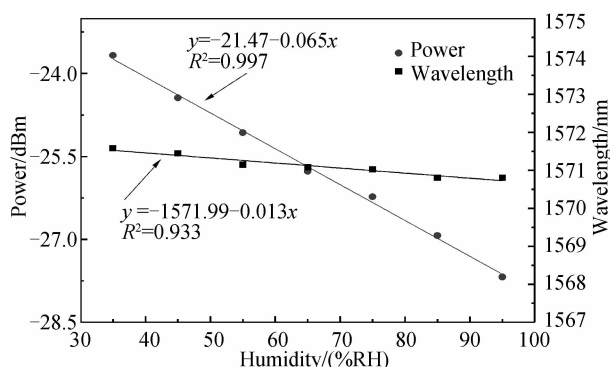


图7 不同湿度下波长和能量的变化

Fig. 7 The wavelength and power changes under different humidity levels

在湿度的测量过程中,温度的变化对传感器干涉光谱也有影响,因此本文对传感器在不同温度下干涉谱的光谱响应进行了实验研究与分析(湿度恒定),同样将传感器拉直固定在可程式恒温恒湿试验机中进行实验.设定湿度为75%RH,温度从30~80℃每间隔10℃改变一次温度,记录监测点所对应的波长和能量.

如图8,实验中仍选取1571.37 nm处波谷作为监测对象,记录不同温度下传感器干涉谱变化,图中不同线型表示不同的温度.从图中可以看出随着温度的升高波长向长波方向发生漂移(红移)漂移量是3.45 nm,能量逐渐增大,变化了1.98 dB.

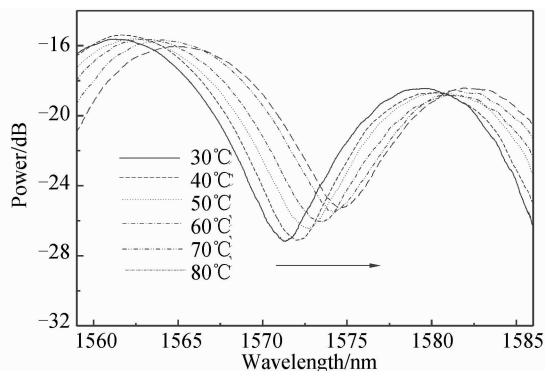


图8 传感器在不同温度下的干涉光谱

Fig. 8 The interference spectra of the sensor under different temperatures

图9是干涉谱波长和能量随温度变化规律.实线为线性拟合曲线.从图中可以得出温度关于波长的灵

灵敏度是 69.4pm/°C, 波长随温度变化的线性度是 0.998, 具有较高的线性度; 温度关于能量的灵敏度是 0.042dBm/°C, 线性度是 0.976. 与理论分析一致.

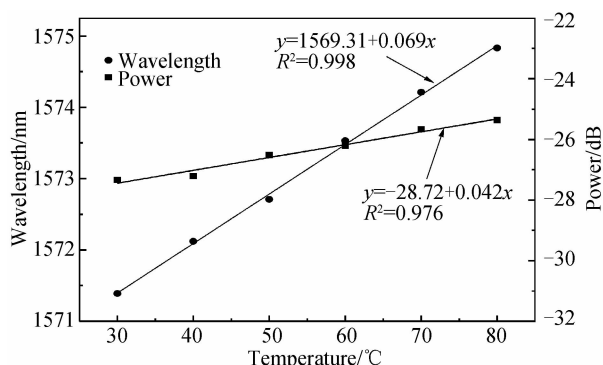


图9 不同温度下波长和能量的变化

Fig. 9 The wavelength and power changes under different temperatures

由实验结果可知, 当外界湿度和温度同时变化时监测点的能量和波长都在改变. 能量、中心波长、湿度和温度之间的关系可以用矩阵来表示为^[18]

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta RH \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 ΔP 和 $\Delta \lambda$ 分别表示干涉谱能量与波长的变化, ΔRH 和 ΔT 分别是外界环境中湿度与温度的变化量, K_{11} 、 K_{12} 、 K_{21} 、 K_{22} 是相应的矩阵系数, 分别表示湿度对于能量的灵敏度, 温度对于能量的灵敏度, 湿度对于波长的灵敏度, 温度对于波长的灵敏度. 由线性拟合曲线可以得到 $K_{11} = -0.0650$, $K_{22} = 0.0694$, $K_{12} = 0.0420$, $K_{21} = -0.0134$. 于是对于该传感器可得到系数矩阵为

$$\begin{bmatrix} -0.0650 & 0.0420 \\ -0.0134 & 0.0694 \end{bmatrix}$$

当湿度和温度同时变化时, 由式(7)可以得到湿度与温度的改变量为

$$\begin{bmatrix} \Delta RH \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{|M|} \begin{bmatrix} K_{22} & -K_{12} \\ -K_{21} & K_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 $|M| = K_{22}K_{11} - K_{12}K_{21}$. 当湿度温度给定时由式(8)可以得到湿度和温度各自的表达式, 从而可以实现湿度与温度的区分测量.

湿度和温度的测量误差为

$$\begin{bmatrix} \delta(\Delta RH) \\ \delta(\Delta T) \end{bmatrix} = |M^{-1}| \begin{bmatrix} \delta(\Delta P) \\ \delta(\Delta \lambda) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $\delta(\Delta P)$ 和 $\delta(\Delta \lambda)$ 分别表示光谱仪的能量测量分辨率和温度测量分辨率, 本实验中仪器能量的最小分辨率为 0.01 dB, 波长的最小分辨率是 0.02 nm. 式中

$$M^{-1} = \frac{1}{|M|} \begin{bmatrix} K_{22} & -K_{12} \\ -K_{21} & K_{11} \end{bmatrix} = \frac{1}{0.00395} \begin{bmatrix} 0.0694 & -0.0420 \\ 0.0134 & -0.0650 \end{bmatrix}$$

将实验测得的实验结果代入可得到测量误差为

$$\begin{bmatrix} \delta(\Delta RH) \\ \delta(\Delta T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0694 \\ 0.2613 \end{bmatrix}$$

分析可知实验中对于结果的测量误差主要有两个来源, 一是外界条件, 包括观测者自身在实验过程中带来的使用误差和人身误差, 被测量环境中湿度和温度的不均匀带来的偶然误差, 可以通过减小人身误差和测量多组数据取平均值减小误差; 二仪器误差, 由使用仪器本身不够精密所造成的测量结果和实际结果的误差.

3 结论

提出并实验验证了一种基于普通单模光纤粗锥级联结构的 MZI 湿度传感器. 在单模光纤上熔接粗锥, 构成光纤锥-单模光纤-光纤锥-单模光纤-光纤锥结构的全光纤湿度传感器. 对该传感器传光理论进行了分析, 研究了传感器对环境湿度、温度变化的传感特性. 实验结果表明当外界环境中湿度变化时, 传感器干涉谱的波谷能量随着湿度的增加而减小, 湿度在 (35~95)%RH 变化范围内其灵敏度可达 $-0.065\text{dB}/\%RH$, 线性度为 0.997; 当外界温度升高时, 干涉谱的波长向长波方向漂移, 温度在 30~80 °C 范围内, 其响应灵敏度为 69.4pm/°C, 线性度为 0.998. 该传感器无涂覆任何增敏材料, 制作简便, 造价低廉, 可以实现湿度、温度同时在线监测, 具有很好的应用前景.

参考文献

- [1] TANG Jie-yuan, CHEN Zhe, LUO Yun-han, *et al.* Side polished SMS fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10):1187-1192.
唐洁媛, 陈哲, 罗云瀚, 等. 侧边抛磨 SMS 光纤传感器[J]. 光子学报, 2013, **42**(10):1187-1192.
- [2] SIMIN M, PHILIP K, MALANCHA G, *et al.* Hybrid microcavity humidity sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(24):241101.
- [3] ZU Peng, XIANG Wang-hua, JIN Yong-xing. Fabrication of temperature-insensitive twist sensor using low birefringent photonic crystal fiber based sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9):1433-1437.
祖鹏, 向望华, 金永兴. 基于低双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的超低温度系数扭曲传感器[J]. 光子学报, 2011, **40**(9):1433-1437.
- [4] LINH V N, MIKHAIL V, KAMAL A. Three-wave fiber Fabry-Pérot interferometer for simultaneous measurement of temperature and water salinity of seawater[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(7):450-452.
- [5] XU W, HUANG W B, HUANG X G, *et al.* A simple fiber-optic humidity sensor based on extrinsic Fabry-Perot cavity constructed by cellulose acetate butyrate film[J]. *Optical Fiber Technology*, **19**(6):583-586.
- [6] CHEN L H, CHAN C C, LI T, *et al.* Chitosan-coated polarization maintaining fiber-based sagnac interferometer for relative humidity measurement[J]. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 2012, **18**(5):1597-1604.

- [7] XIANG Guang-hua, HU Man-li, QIAO Xue-guang, *et al.* Study on characteristics of FBG humidity Sensor based on polyimide [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(1):41-45.
向光华, 忽满利, 乔学光, 等. 基于聚酰亚胺材料的 FBG 湿度传感特性研究[J]. *光电子 • 激光*, 2012, **23**(1):41-45.
- [8] BATUMALAY M, LOKMAN A, AHMAD F, *et al.* Tapered plastic optical fiber coated with HEC/PVDF for measurement of relative humidity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(12): 4702-4705.
- [9] CHEN L H, LI T, CHAN C C, *et al.* Chitosan based fibre-optic Fabry-Petro humidity sensor[J]. *Sens. Actuators B*, 2012, **169**: 167-172.
- [10] MATHEW J, SEMENOVA Y L, RAJAN G, *et al.* Humidity sensor based on a photonic crystal fiber interferometer [J]. *Electronics Letters*, 2010, **46**(19):1341-1343.
- [11] WU Q, SEMENOVA Y L, MATHEW J, *et al.* Humidity sensor based on a single-mode heterocore fiber structure [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(10):1752-1754.
- [12] ZHANG Xiao-kang, YE Xiao-jing, CHEN Zhi-dong. Doubly cladding single-mode optical fiber sensors and its application in temperature and humidity sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6):0606004.
张小康, 叶晓靖, 陈志东. 双包层单模光纤传感器及其在温度/湿度传感方面的应用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6):0606004.
- [13] XU F, LI C, REN D X, *et al.* Temperature-insensitive Mach-Zehnder interferometric strain sensor based on concatenating two waist-enlarged fiber tapers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(7):070603.
- [14] WU D, ZHU T, DENG M, *et al.* Refractive index sensing based on Mach-Zehnder interferometer formed by three Cascaded single-mode fiber tapers [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(11):1548-1553.
- [15] SHAO M, QIAO X G, FU H W, *et al.* An in-fiber Mach-Zehnder interferometer based on arc-induced tapers for high sensitivity humidity sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(5):2026-2031.
- [16] LI Hui-dong, FU Hai-wei, SHAO Min, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on fiber core etched air-bubble and core diameter mismatch for liquid refractive index sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(21): 214214.
李辉栋, 傅海威, 邵敏, 等. 基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(21):214214.
- [17] SHAO M, QIAO X G, FU H W, *et al.* A Mach-Zehnder interferometric humidity sensor based on waist-enlarged tapers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, **52**:86-90.
- [18] RONG Q Z, QIAO X G, ZHANG J, *et al.* Simultaneous measurement for displacement and temperature using fiber bragg grating cladding mode based on core diameter mismatch [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(11):1645-1650.