

光纤 Michelson 干涉仪型折射率和温度同时测量传感器

闫旭¹,傅海威²

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071;

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

摘要:基于 Michelson 干涉仪原理,制作了一种可同时测量折射率和温度的全光纤传感器。传感器由单模光纤和一段长度为 5 mm 的细芯光纤错位熔接而成。对该传感器的折射率和温度响应特性进行理论分析,并在折射率和温度的变化范围分别为 1.333 3~1.404 9 和 20~90 °C 的环境中对该传感器的响应特性进行实验研究,结果表明,随着环境折射率的变化,该传感器输出光谱峰值功率的响应灵敏度为-41.10 dB/RIU,而光谱峰值波长对折射率变化不敏感;随着环境温度的变化,该传感器输出光谱峰值波长的响应灵敏度为 23.15 pm/°C,而光谱峰值功率对温度变化不敏感。因此,通过同时监测传感器输出光谱的功率变化和波长漂移量,可实现折射率和温度的同时测量。该传感器制作简单,测量精度高,在生物医学领域有较好的应用前景。

关键词:光纤光学;干涉型光纤传感器;光纤 Michelson 干涉仪;折射率和温度传感;区分测量

中图分类号:TN384

文献标识码:A

Fiber Sensor for Simultaneous Measurements of Refractive Index and Temperature Based on a Michelson Interferometer

YAN Xu¹, FU Haiwei²

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Ministry of Education Key Lab. on Photoelectric Oil-gas Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract:An all fiber sensor for simultaneous measurements of refractive index and temperature was fabricated based on Michelson interferometer. The proposed sensor is composed of a single-mode fiber (SMF) core-offset fusion spliced with a thin-core fiber (TCF) with length of 5 mm. The response characteristics of the sensor for the surrounding refractive index (SRI) and temperature variations are theoretically analyzed and experimentally demonstrated. The proposed Michelson interferometer is demonstrated with the sensitivities of -41.10 dB/RIU and 23.15 pm/°C for the SRI and temperature variations at the range of 1.333 3~1.404 9 and the temperatures changes at the range of 20~90 °C. The simultaneous measurements have been carried out via the power-referenced for SRI and wavelength-referenced for temperature. The theoretical analysis of the sensor is in good agreement with the experiment. This kind of sensor, with easy fabrication and high measurement accuracy, can offer the attractive applications to biomedical sensing.

Key words:optical fiber; interferometric fiber-optic sensors; fiber Michelson interferometer; refractive index and temperature measurement; discriminating measurement

0 引言

干涉型光纤传感器因其稳定性好、灵敏度高、测量对象广泛等优点,近年来被广泛用于折射率^[1-2]、温度^[3-4]、振动^[5]、加速度^[6]等多种物理量的测量。其中,环境折射率检测广泛用于生物医学、环境监测、食品加工等领域,是国内外众多科研工作者研究

的热点之一。文献[7]通过级联两个单模细锥结构实现了折射率和温度的同时测量,该传感器的优点是制作简单,且具有较高的灵敏度和精度。文献[8]设计并制作了一个粗锥与一个细锥级联的马赫-曾德尔光纤传感器实现了折射率和温度的同时测量。文献[9]提出单模-多模-细芯-多模-单模结构的光纤

收稿日期:2016-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61275088、61077060);西安石油大学硕士研究生创新基金资助项目(2014cx130842)

作者简介:闫旭(1990-),男,陕西榆林人,博士生,主要从事光通信和光传感方面的研究。

传感器在折射率变化范围 1.332 5~1.372 0 和温度变化范围 22~82 °C 内实现了折射率和温度的同时测量。文献[7-9]均是通过同时监测传感器干涉光谱中两个不同的干涉峰(谷)值波长随环境折射率和温度的变化而产生的漂移量来研究传感器的双参量响应特性。光纤传感器的透射光谱一般由多个包层模分别与纤芯模干涉后叠加形成,因此,通过实验测得的灵敏度实际上是一种由多套干涉条纹同时对环境折射率和温度变化产生响应的综合效应。不同包层模对环境变化的响应不同,随着实验的进行,一些包层模式易泄露到环境中,导致传感器干涉模式在测量过程中不稳定,进而导致传感器测量存在着一定的误差。因此,研究制作一种结构工艺简单、模式单一、精度高、可同时测量折射率和温度变化的光纤传感器是非常有意义的。本文采用单模光纤(SMF)和细芯光纤(TCF),结合光纤错位熔接技术,制作了一种可同时测量折射率和温度的光纤 Michelson 干涉仪型传感器。对该传感器的折射率和温度响应特性分别进行了理论分析和实验研究。该传感器中仅存在一个占绝对优势的包层模与纤芯模进行干涉,有效降低了多模干涉所引起的测量误差。通过监测传感器干涉光谱的峰值功率和波长变化可实现环境折射率和温度变化的同时测量。

1 传感器制作及实验原理

SMF 和 TCF 的纤芯直径不匹配,二者的纤芯直径分别为 $\varnothing 9 \mu\text{m}$ 和 $\varnothing 6.5 \mu\text{m}$,包层直径分别为 $\varnothing 125 \mu\text{m}$ 和 $\varnothing 120 \mu\text{m}$ 。如图 1 所示,将长度为 5 mm 的 TCF 与 SMF 错位熔接,错位量为 $5 \mu\text{m}$ 。选取 TCF 的长为 5 mm 是因为经多次实验发现,该长度下产生的干涉谱的峰谷数在宽带光源的光谱范围内分布均匀,适合进行传感测量。错位量选择 $5 \mu\text{m}$ 是因为在下述的熔接参数下制作的传感器的输出光谱具有较好的对比度,同时具有较好的重复性。熔接参数如下:放电开始强度为 +90、结束强度为 +90、预熔时间为 160 ms、偏移量为 $5 \mu\text{m}$ 。光波经导入光纤传输至单模-细芯区域时将在 TCF 中激发出包层模和纤芯模,这些光波模式在 TCF 的尾端

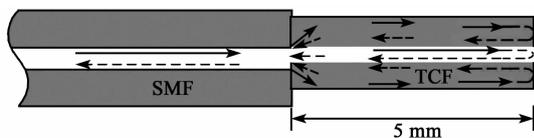


图 1 传感器结构和传光原理示意图

发生反射,并在细芯-单模错位熔接点处再次耦合成为 SMF 的纤芯模而输出,干涉图样如图 2 所示。

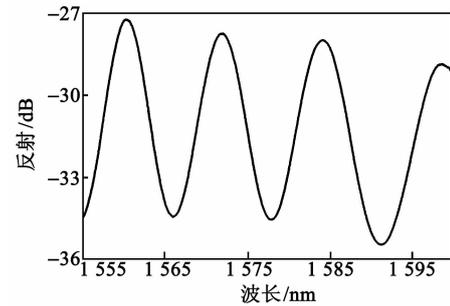


图 2 传感器干涉光谱图

图 3 为该传感器透射光谱的模式特征,通过对图 2 所示图样进行快速傅里叶变换得到。根据文献[10]的研究,TCF(传感臂)长度 L 、中心波长 λ_0 与空间频率 ξ 的关系为

$$\xi = \frac{1}{\lambda_0} \Delta m L \quad (1)$$

式中 Δm 为模式群折射率差。由式(1)可得在 L 一定时, ξ 与干涉模式相对应。图 3 中有且仅有一个明显的主峰存在。因此,本文设计的传感器的输出光谱可以认为仅由一个包层模与纤芯模干涉形成。通常的全光纤 Michelson 干涉仪输出光谱总是由多个包层模分别与纤芯模干涉后叠加形成,由于部分包层模式并不能在测量过程中稳定存在,从而导致传感器测量存在着一定的误差。本文设计制作的传感器可有效降低这种由多模干涉所引起的测量误差。

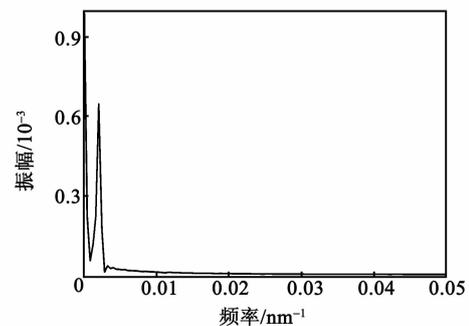


图 3 传感器的空间频谱

保持环境温度恒定,当环境折射率变化时,参与干涉的纤芯模和包层模在 TCF 端面的振幅反射系数 R 将会发生相应地改变。根据文献[11],该传感器的输出光强为

$$I = R^2 \cdot |E_{in} \cdot [1 + \exp(i\varphi)]|^2 \quad (2)$$

式中: E_{in} 为入射光波的电场强度; φ 为模式间的相位差。 R 是外界环境折射率的函数,由式(2)可知,

R 的变化将影响传感器的输出光强。

随着温度变化,传感臂的物理长度、模式的有效折射率都将发生变化,进而导致传感器透射光谱发生漂移。传感器的透射光谱随温度变化产生的漂移量^[1]为

$$\Delta\lambda_j = \frac{\Delta T}{j} [\Delta n(T_0) \cdot L(T_0) \cdot \alpha_s + \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Delta T \cdot L(T_0) \cdot (1 + 2\alpha_s \Delta T)] \quad (3)$$

式中: α_s 为光纤的热膨胀系数; j 为实验所监测的干涉峰(谷)的级次; $L(T_0), L(T), \Delta n(T_0)$ 和 $\Delta n(T)$ 是温度分别为 T_0 和 T 时 L 和 $n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}$ 的值。

当环境折射率和温度同时发生变化时,基于传感器对环境折射率和温度变化的响应特征,传感器的灵敏度系数矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\text{RI}} & 0 \\ 0 & K_{\text{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: Δp 和 $\Delta \lambda$ 分别为传感器输出光谱功率的变化量和波长的漂移量; K_{RI} 和 K_{T} 分别为传感器对环境折射率和温度变化的响应灵敏度。

2 实验及结果分析

实验配置(见图 4)了一定浓度梯度的蔗糖溶液作为折射率样品。实验过程中仅将细芯光纤的端面浸没在折射率样品中,通过 MS740A 型光谱仪来记录传感器输出光谱对环境折射率的响应特性,如图 5 所示。

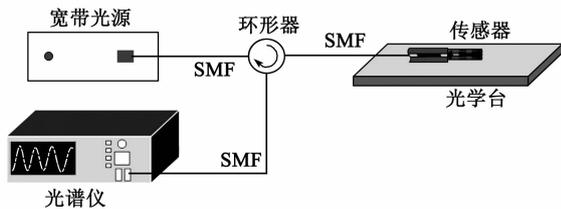


图 4 实验装置

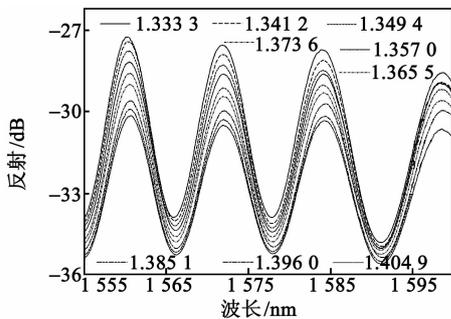


图 5 不同环境折射率中传感器的输出光谱

由图 5 可见,在 1.3333~1.4049 内,传感器输出光谱的峰值功率随着环境折射率的增大而减小,且实验过程中光谱的波长几乎不发生漂移。以输出光谱中 1572 nm 处的峰值为例对实验数据进行拟合,传感器对折射率变化的响应灵敏度 $K_{\text{RI}} = -41.40 \text{ dB/RIU}$,结果如图 6 所示。

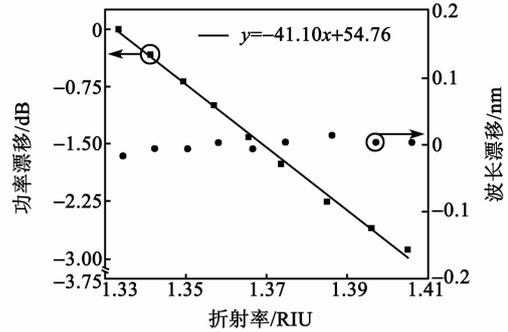


图 6 干涉谱峰值波长和功率随环境折射率的变化关系

实验测定传感器温度响应时,将水浴箱由 20 °C 加热到 90 °C,温度每升高 10 °C 记录一次传感器输出光谱,结果如图 7 所示。由图可见,随着环境温度的升高,传感器输出光谱向长波方向发生漂移,同时发现输出光谱的功率变化很小。以输出光谱中 1572 nm 处的峰值为例,对实验数据进行拟合,该传感器对环境温度变化的 $K_{\text{T}} = 0.02315 \text{ nm/}^\circ\text{C}$,结果如图 8 所示。

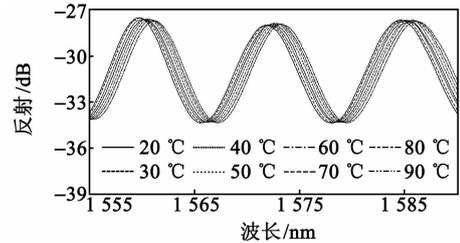


图 7 不同温度下传感器的干涉光谱

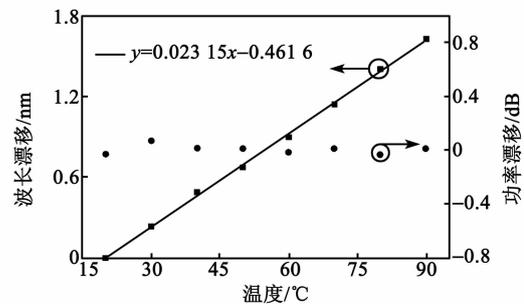


图 8 干涉谱峰值波长和功率随环境温度的变化关系

将 $K_{\text{RI}} = -41.40 \text{ dB/RIU}$ 和 $K_{\text{T}} = 0.02315 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 代入式(4),并将灵敏度系数矩阵进行转置。

通过测量传感器输出光谱的功率变化和波长漂移可实现环境折射率和温度的同时测量。

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.024 & 33 & 0 \\ 0 & & 43.20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

3 结束语

设计并制作了单模-错位熔接点-细芯结构的可同时测量折射率和温度的光纤 Michelson 干涉仪型传感器,并对该传感器的折射率和温度响应特性进行了理论分析和实验研究。实验研究表明,环境折射率的变化使传感器输出光谱的光功率发生变化,而光谱的波长未发生响应;环境温度的变化使传感器输出光谱的波长发生漂移,而光谱的光功率未发生响应。因此,利用该传感器对环境折射率的光功率响应特性和对温度的波长响应特性可以实现环境折射率和温度的同时测量。该传感器干涉光谱中仅存在一个绝对占优的包层模,因而传感器测量精度高,在生物医学领域有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 傅海威,闫旭,李辉栋,等. 基于纤芯失配型马赫-增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.
FU Haiwei, YAN Xu, LI Huidong, et al. Study of fiber sensor for simultaneous measurements of refractive index and temperature based on a core-mismatch Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11):1106001
- [2] 谭耀成,楼俊,许宏志,等. 光纤倏逝波吸收传感器灵敏度模拟分析[J]. 压电与声光, 2013, 35(6): 810-813.
TAN Yaocheng, LOU Jun, XU Hongzhi, et al. Simulation and analysis of sensitivity for optical fiber evanescent wave absorbing sensors[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(6):810-813.
- [3] RONG Qiangzhou, QIAO Xueguang, GUO Tuan, et al. Temperature-calibrated fiber-optic refractometer based on a compact FBG-SMS structure[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(13):030604.
- [4] 黄泽铤,李强,徐雅,等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6):0605001.
HUANG Zejia, LI Qiang, XU Ya, et al. All-fiber temperature sensor based on grapheme[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6):0605001.
- [5] WENG Yinyan, QIAO Xueguang, FENG Zhongyao, et al. Compact FBG diaphragm accelerometer based on L-shaped rigid cantilever beam[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(10):100604.
- [6] 于洋,张学亮,宋章启,等. 微光纤耦合器制作及振动传感特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105002.
YU Yang, ZHANG Xueliang, SONG Zhangqi, et al. Investigation of fabrication and vibration sensing properties of optical microfiber coupler [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11):1105002.
- [7] LU Ping, MEN Liqiu, SOOLEY K, et al. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94:131110.
- [8] ZHANG Shanshan, ZHANG Weigang, GENG Pengcheng, et al. Fiber Mach-Zehnder interferometer based on concatenated down-and up-tapers for refractive index sensing applications [J]. Optics Communications, 2013, 28:47-51.
- [9] LI Lecheng, XIA Li, XIE Zhenhai, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using thinned fiber based Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Communications, 2012, 285:3945-3949.
- [10] CHOI H Y, KIM M J, LEE B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2007, 15(9):5711-5720
- [11] KIM Y H, PARK S J, JEON S W, et al. Thermo-optic coefficient measurement of liquids based on simultaneous temperature and refractive index sensing capability of a two-mode fiber interferometric probe[J]. Optics Express, 2012, 20(21):23744-23754.