

基于马赫增德尔折射率光纤传感器的研究

祁梅霞, 杨树

(北京邮电大学理学院, 北京 100876)

5

摘要: 本文介绍了一种基于马赫-增德尔的干涉型折射率光纤传感器, 将去掉包层的传感臂直接浸入待测液体中, 并与另一带有包层的相同光纤结构进行耦合。当改变待测液体折射率时, 通过波长调制技术实现对干涉波形的解调, 从而实现待测液体折射率的测量。结果显示 1510.54nm 的干涉谷对折射率的灵敏度为 915.41nm/RIU, 最小分辨率误差为 4.65e-5。该结构具有良好的灵敏度, 同时结构简单、制作成本低, 具有较好的应用前景。

10

关键词: 干涉型折射率光纤传感器; 马赫-增德尔; 波长调制

中图分类号: O4

Research on Mach-Zehnder Refractive Index Fiber Sensor

15

Qimeixia, Yang shu

(College of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: This paper introduces an interferometric refractive index fiber sensor based on Mach-Zehnder. The sensing arm without cladding is directly immersed in the liquid to be measured and coupled with another same fiber structure with cladding. When the refractive index of the liquid to be measured is changed, the interference waveform is demodulated by wavelength modulation technology, so as to measure the refractive index of the liquid to be measured. The results show that the sensitivity of 1510.54nm interference valley to refractive index is 915.41nm/RIU, and the minimum resolution error is 4.65e-5. The sensitivity of the structure is greatly improved, and at the same time, The structure has good sensitivity, simple structure, low manufacturing cost and good application prospect.

20

25

Key words: Interferometric refractive index optical fiber sensor; Mach-Zehnder; wavelength modulation

0 引言

30

干涉型光纤传感器由于其高灵敏度、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、结构紧凑、设计灵活多变、体积小等显著优势获得了国内外广大学者的青睐^[1], 人们针对各种各样的干涉型结构进行了大量研究, 使其广泛应用于工业、医疗、航空航天、生物等诸多领域以实现对多种不同外界待测参量的高精度测量。常见的光束干涉型光纤传感器有马赫-增德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI)^[2]、法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI)^[3]、迈克尔逊干涉仪 (Michelson Interferometer, MI)^[4]和萨格纳克 (Sagnac Interferometer, SI)^[5]干涉仪。其解调方式主要有强度调制、相位调制、频率调制、波长调制等, 可根据具体情况选择合适解调方式^[6]。

35

40

本文讨论的是一种基于马赫-增德尔的干涉型折射率光纤传感器结构, 其参考臂为标准单模光纤, 传感臂为去掉包层被直接浸入到待测液体中的相同单模光纤。当待测液体折射率发生改变时会引起传感臂中光束相位发生偏移进而与参考臂中的光束存在相位差, 经两臂传输的光束相遇后发生干涉, 通过测量干涉频谱在某特定波谷的变化量从而实现对待测液体折射率的测量, 下图 1 为其平面结构图:

作者简介: 祁梅霞 (1996-), 女, 硕士, 干涉型光纤传感器

通信联系人: 杨树, 男, 副教授, 硕导, 微纳光子学. E-mail: syang@bupt.edu.cn

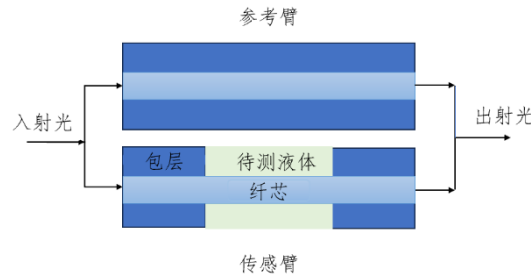


图 1 结构图

Fig.1 Schematic diagram of the sensor

45 **1 干涉型马赫增德尔光纤传感器的基本原理**

对于 MZI 传感器，经过两臂传输发生干涉的两光束光强可表示为：

$$I = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos(\phi) \quad (1)$$

式中， I_s 为传感臂中传输光的光强， I_r 为参考臂中传输光的光强， ϕ 是两束光的相位差，具体为：

50
$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{effr} - n_{effs})L_h - \frac{2\pi}{\lambda} n_{effr} \Delta L + \theta_c \quad (2)$$

式中 n_{effr} 和 n_{effs} 分别为参考臂与传感臂中传输光的有效折射率；参考臂与传感臂的光纤长度不相等， L_h 是传感臂的长度， ΔL 是两臂长度差；因传感臂为去掉包层后直接浸入待测液体中，所以出现了两个分界面，导致光经过两分界面时存在定域性耦合而发生相位变化， θ_c 即为两界面总的相位变化量。

55 而整个结构的分辨率误差为下式：

$$\Delta n_a^R = \frac{\left(-\frac{dn_{eff}}{\lambda} + \frac{\partial n_{effr}}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_{effs}}{\partial \lambda}\right)L_h + \left(\frac{n_{effr}}{\lambda} - \frac{\partial n_{effr}}{\partial \lambda}\right)\Delta L}{\left(\frac{\partial n_{effr}}{\partial n_a} - \frac{\partial n_{effs}}{\partial n_a}\right)L_h - \frac{\partial n_{effr}}{\partial n_a}\Delta L} \Delta \lambda \quad (3)$$

公式 (3) 中的 $\Delta \lambda$ 为光谱仪的分辨率误差，本文取 0.05nm， n_a 为待测液体折射率。测量灵敏度为 ε ：

$$\varepsilon = \frac{1}{\Delta n_a^R} \quad (4)$$

60 根据以上公式可看出，系统的灵敏度与光纤有效折射率以及传感段长度 L_h 、两臂长度差 ΔL 等因素有关，当使用波长调制时，可以选择波峰或者波谷的位置进行测量，因为这两个点的位置比较特殊，理论相位为 0、 π ，现实中可以通过修正法不断逼近真实 0、 π 点，故而可以很精确的进行相关测量。通过改变待测液体折射率，进而改变干涉光谱的波形，通过检测同一波峰或波谷处的干涉波形移动情况，便可得出系统的灵敏度。

65 本文选取波谷 A 作为观测点，通过记录不同待测液体折射率中的波谷位置进而反求出环境待测量。

2 仿真计算

MMZI 结构主要是通过 3dB 耦合器的分光作用，使得两束光在经过具有长度差的两臂后满足干涉条件，进而可以通过观测干涉波形获得结构参量的变化情况。本文采用二氧化硅作

70 为纤芯，CYTOP 为包层，纤芯半径 $1.4\mu\text{m}$ ，当同时满足相位差可测量及折射率可测量时，折射率变化范围可以取为 $1.31\sim 1.36$ ， L_h 为 $285\mu\text{m}$ ， ΔL 为 $32\mu\text{m}$ ，通过将传感臂的单模光纤去掉部分包层后直接浸入待测液体，此时便会产生干涉效应。利用 FDTD Solutions 软件进行仿真，用 MATLAB 进行数值处理。本文中所使用的光谱分析仪分辨率为 0.05nm 。

75 下图2便是折射率 n_a 为 1.31 对应的干涉光谱图：其中 A 波谷波长所在位置为 1510.54nm ，后续测量以此为观测点。而图 3 为不同折射率下的光谱对波长的依赖图，可以看出，对于波形中的同一点，当折射率增大的时候，干涉波形会发生红移，反之，发生蓝移。

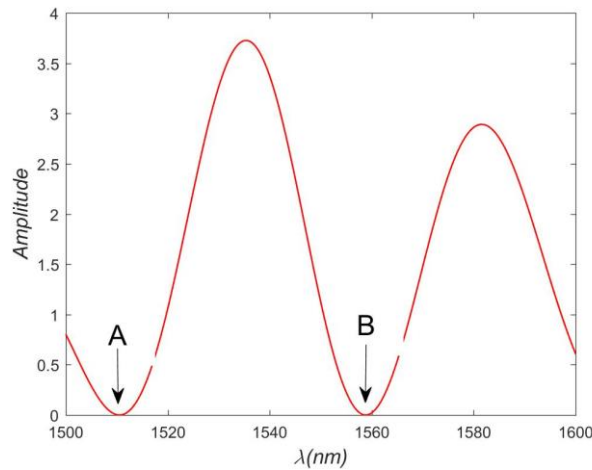


图 2 n_a 为 1.31 的干涉谱
Fig.2 Interference spectrum when n_a is 1.31

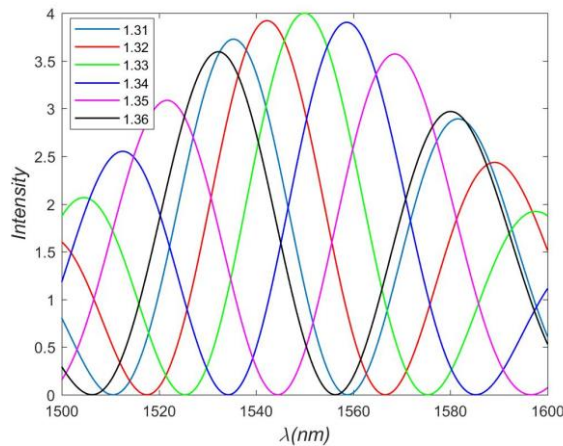


图 3 不同 n_a 下的干涉谱
Fig.3 Interference spectrum response to different n_a

80 当环境折射率 n_a 改变时，干涉波谷 A 会发生移动，下图 4 给出了波谷 A 随着液体折射率变化的位置变化情况。可以看出，该结构中，波谷移动位置在误差范围内与液体折射率成线性正相关，这是因为系统是双光束干涉，两传输臂结构类似，关系比较简单，所以光强差距不会很大。并且在整个波长测量范围内，相位差可测量，不会出现波谷混淆的问题。对于传统的 MZI 结构，本文设置的结构更简单、易操作、成本低。

85

90 当环境折射率 n_a 由 1.31~1.36 时,干涉波谷 A 位置移动量为 45.77nm,折射率敏感度为 915.41nm/RIU (RIU 为单位折射率)。实际操作中,所使用的光谱分析仪分辨率为 0.05nm,故该结构测量折射率的最小分辨率误差为 $4.65e-5$ 。要想进一步提高结构的性能,降低误差,可以选择更小波长分辨率的光谱仪。

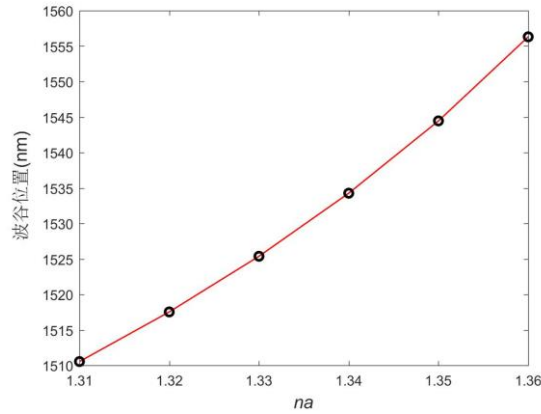


图 4 干涉谷 A 随 n_a 变化的波长偏移量
Fig.4 Wavelength offset of the interference dip A as n_a varies

95 3 结论

本文基于传统MZI双光束干涉结构,将去掉包层的传感光纤直接浸入待测液体中,利用波长调制技术,通过监测干涉光谱的波谷移动情况,反推得到待测环境折射率的变化情况。选取1.31折射率对应的1510.54nm波谷,当折射率变化0.05时,其灵敏度可达915.41nm/RIU。当所使用的光谱分析仪分辨率为0.05nm,该结构测量折射率的最小分辨率误差为 $4.65e-5$ 。虽然结构灵敏度不是特别高,但所测折射率范围大,结构成本低,制作容易,有着不错的发展前景。

[参考文献] (References)

105 [1] Liu W, Sun C, Geng T, et al. A New Spring-Shaped Long-Period Fiber Grating with High Strain Sensitivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(14):1163-1166.
 [2] S. R S E,E. A A, M. M B, et al. Modelling, characterization, and applications of silicon on insulator loop terminated asymmetric Mach Zehnder interferometer[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 3598-3598.
 [3] Rui P, Wenlong Y, Linjun L, et al. High-sensitive fiber-optic pressure sensor based on Fabry-Perot interferometer filled with ultraviolet glue film and Vernier effect[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 67.
 110 [4] Mandal, Sagarika, Sinha, et al. An analytical approach of soliton-based binary code suppression and recovery by proper using of electro-optic modulator and Michelson interferometer[J]. Journal of Optics, 2022, 51(2): 1-5.
 [5] A. A Z, V. T C,V. K S, et al. Distributed Acoustic Sensor Using a Double Sagnac Interferometer Based on Wavelength Division Multiplexing[J]. Sensors, 2022, 22(7): 2772-2772.
 115 [6] Y. Zhang, A. Zhou, B. Qin, H. Deng, Z. Liu, J. Yang, L. Yuan, Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers, J. Lightwave Technol. 32(2014): 1734-1740.