光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.004

一种基于双模干涉的光纤折射率传感器

王 钧*，杨 树

（北京邮电大学 理学院，北京 100876）

摘 要： 为实现高灵敏度的折射率测量，设计了一种基于双模干涉的光纤折射率传感器，该传感器为单模-多模-单模光纤（SMS）结构，其中单模光纤和多模光纤具有相同的直径和纤芯折射率。剥去多模光纤的包层，将其置于待测环境中，多模光纤中激发出的两个模式之间会发生干涉，当待测环境折射率发生变化时，干涉谱中的波谷会发生移动，可根据光谱中波谷的移动量来实现对折射率的测量。利用 FDTD Solutions 软件进行仿真模拟，得到不同折射率下的干涉谱，结果表明，位于 1 517.32 nm 的干涉谷对折射率的敏感度为 1 848.2 nm/RIU，最小分辨率误差仅为 2.74×10^{-5} RIU。该传感器较传统光纤传感器而言，结构简单，有着高灵敏度、低分辨率误差等优点，应用前景广阔。

关键词： 光纤传感器；双模干涉；波长调制；折射率；光纤干涉仪

中图分类号： TN253；TP212 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0476－04

An Optical Fiber Refractive Index Sensor Based on Double-mode Interference

WANG Jun, YANG Shu

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

Abstract: To achieve high-sensitivity refractive index measurement, an optical fiber refractive index sensor based on double-mode interference is designed. The sensor is a single-mode-multimode-single-mode fiber (SMS) structure, in which the single-mode fiber and the multi-mode fiber are of the same diameter and core refractive index. To strip the cladding of the multimode fiber and place it in the environment to be measured, interference will occur between the two modes excited out of the multimode fiber. The transmission dips of the sensor will shift when the ambient refractive index changes, so the simultaneous measurement of the refractive index can be achieved by monitoring the wavelength shifts. Using FDTD Solutions software for simulation, the interference spectra at different refractive index were obtained. The results show that the sensitivity of the dip at 1 517.32 nm to the refractive index is 1 848.2 nm/RIU, and the minimum resolution error is only 2.74×10^{-5} RIU. Compared with the traditional optical fiber sensor, the sensor processes simple structure, high sensitivity and low resolution, making it has high potential applications.

Key words: optical fiber sensor; double-mode interference; wavelength modulation; refractive index; optical fiber interferometer

0 引言

光纤传感器以其结构简单、尺寸小、抗电磁干扰能力强、制作成本低、耐腐蚀、测量动态范围大、稳定性好等优点而备受关注，并且灵敏度高、信息容量大，已被广泛应用于医药、生物、化学等领域[1]。干涉型光纤传感器的基本原理是：当外界环境的待测

收稿日期：2020－04－06.

*通信作者：王 钧 E-mail: highlightwj@163.com

物理量发生变化时，利用干涉技术得到光纤内传输光强的变化，从而根据干涉光谱图检测出外界参量的变化。据此，光纤干涉传感器可被用于对多种环境参量的测量中，如折射率、温度、环境湿度、应变、压力等。目前，常用的光纤干涉传感器有：马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer）、迈克尔逊干涉仪（Michelson Interferometer）、法布里-珀罗干涉仪（Fabry-Perot Interferometer）以及赛格耐克环形干涉仪（Sagnac Fiber Loop Interferometer）[2]。对于光纤传感器的解调，有多种方法实现，如利用干涉谱的强度、波长、相位等参量来进行解调，得到需要测量的物理量，具体可根据实际情况来选择不同的解调方法[3]。

上述常用光纤传感器主要是利用单模光纤来组合得到相关干涉仪的结构，随着科技的发展，越来越多的特种光纤也被应用到了光纤传感领域中，如多模光纤、保偏光纤、光子晶体光纤、空芯光纤等，成为了现代光纤传感器的重要组成部分。对于传统模式干涉型光纤传感器，大多是多个模式之间的干涉，一般是从实验得到测量结果，无法对误差及灵敏度进行明确的数值理论分析。本文通过调整结构参数使多模光纤中仅激发 HE_{11} 模和 HE_{12} 模，即以双模干涉来实现对待测环境折射率的测量。对比传统多模干涉型光纤传感器，双模干涉型光纤传感器有着较高的灵敏度，并且可以得到定量的解析表达式，可以从理论上具体分析误差及灵敏度，物理机制较为清晰，对传感器的性能有着更进一步的认知。

1　基于双模干涉的光纤折射率传感器的基本原理

在基于模式干涉的光纤传感器中，主要是基模与高阶模发生干涉，当仅存在 HE_{11} 模和 HE_{12} 模发生干涉时，传感器内的传输光强可以表示为[4]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\varphi \tag{1}$$

其中，I_1 和 I_2 分别是 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的光强，I 是干涉光谱的强度，φ 为两个模式的相位差：

$$\varphi = \frac{2\pi(n_{\mathrm{effHE}_{11}} - n_{\mathrm{effHE}_{12}})}{\lambda}L = \frac{2\pi n_{\mathrm{eff}}}{\lambda}L \tag{2}$$

式中，λ 为空气中自由空间光波长，L 为传感光纤的长度，$n_{\mathrm{effHE}_{11}}$ 和 $n_{\mathrm{effHE}_{12}}$ 分别是 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的有效折射率，n_{eff} 为两个模式的有效折射率之差。当相位为 $(2k-1)\pi$ 的整数倍时，干涉光强达到最小值，此时对应干涉波形中的波谷，该波谷对应的波长为[5]

$$\lambda_k = \frac{2n_{\mathrm{eff}}}{(2k-1)}L \tag{3}$$

其中，λ_k 表示第 k 级波谷的位置。由式(1)～(2)可看出，干涉谱的强度 I、各波谷对应的波长 λ 与传感光纤的纤芯和包层的折射率以及传感光纤的长度 L 等参量有关。当外界待测环境参量发生变化时，传感光纤的参数也会随之改变，继而导致干涉光谱中的波谷发生漂移或者干涉强度改变。

如果用合适的解调方法对上述光谱中发生的变化进行调制，就能得到需要测量的环境参量。本文采用波长调制来对传感器进行解调，基本原理是通过测量光谱中波谷的漂移量，来得到外界环境参量的信息。一般选取单个或多个波谷作为测量点，当外界环境参量变化时，得到该波谷的波长漂移量。由式(3)，波谷的漂移量可以表示为[6]

$$\Delta\lambda_k = \frac{2(n_{\mathrm{eff}}\Delta L + \Delta n_{\mathrm{eff}}L)}{2k-1} \tag{4}$$

其中，ΔL 为光程差的变化量，Δn_{eff} 为有效折射率的差值变化量。当外界的温度、折射率、应变等物理量发生变化时，ΔL 和 Δn_{eff} 会相应变化，从而使干涉波长产生漂移，若能检测出 ΔL 和 Δn_{eff} 的变化，即能得到外界的参量信息。

该结构的分辨率误差可以表示为

$$\Delta n_{\mathrm{a}} = \Delta\lambda \cdot \frac{\frac{1}{\lambda}(n_{\mathrm{effHE}_{11}} - n_{\mathrm{effHE}_{12}}) + \frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{12}}}{\partial\lambda} - \frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{11}}}{\partial\lambda}}{\frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{11}}}{\partial n_{\mathrm{a}}} - \frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{12}}}{\partial n_{\mathrm{a}}}} \tag{5}$$

式中，$\Delta\lambda$ 为光谱仪的波长分辨率，n_{a} 是待测环境的折射率，φ 为传感器中所传输的两个模式的相位差，如式(2)所示。

干涉波形中的任意一个波谷都可以作为传感器的测量波谷点，每个波谷对应该波谷对外界参量的灵敏度。多模光纤的长度会直接影响干涉波形中的波谷数量，多模光纤越长，在波长范围内可观测到的干涉谷就越多，但同时传感器的传输损耗会增大，不利于波长的解调，故需设计合适的多模光纤长度来进行测量。多模光纤的直径越小，对环境折射率的变化就会越灵敏，但当直径过小时，机械强度会降低，容易折断，考虑到实际光纤的制作难度，也需选择合适的多模光纤直径，所以需综合考虑多模光纤的直径和长度，既要保证传感器拥有良好的机械强

度，也需得到较好的干涉谱进行测量。

对于光纤模式干涉传感器，最常见的一种结构是将两段单模光纤（SMF）和多模光纤（MMF）相熔接而构成的 SMS 结构[7]，当入射光波由单模光纤进入到多模光纤时，由于纤芯模场不匹配，会激发出多个模式在多模光纤中传输，这些模式之间会发生干涉。通过对多模光纤进行后期加工或者改变多模光纤的类型，可以制作出不同类型和功能的传感器，如对多模光纤进行腐蚀、纤芯错位、拉锥成不同形状等后期加工处理[8]。

本文讨论的是一种较为简单的 SMS 结构（见图 1）：令单模光纤和多模光纤的直径相等，且拥有相同的纤芯折射率，剥去多模光纤的包层，将其放入待测环境中，当外界环境参量改变时，干涉谷会发生移动。值得注意的是，去除包层的多模光纤对折射率的响应很灵敏[9]。



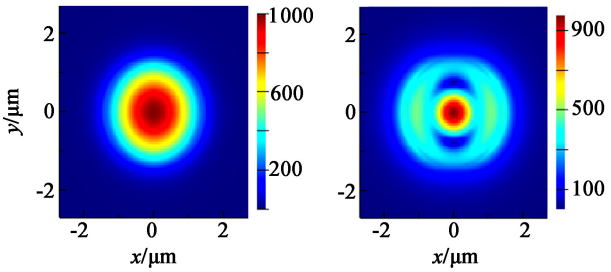
图 1 SMS 结构图

2 仿真计算

本文所探讨的结构中，单模光纤与多模光纤的纤芯直径均为 2.8 μm，二者纤芯折射率相同，均为 1.72，单模光纤的包层折射率为 1.628。剥去多模光纤的包层，将其置于待测环境中，此时仅激发 HE_{11} 模和 HE_{12} 模，多模光纤长 300 μm，据此利用 FDTD Solutions 软件进行仿真计算。在实际实验中，需将宽带光源作为外部入射光的光源，放置在输入 SMF 的一端，中间段的传感光纤放置于待测环境中，将光谱分析仪放置于输出 SMF 的另一端，光谱仪将数据进行处理后在终端显示结果。

图 2 为当待测环境折射率为 1.33，观测波长为 1 550 nm 时单独激发出的 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的模场分布图，二者的有效折射率分别为 1.678 5 和 1.497 3。

图 3 为待测环境折射率为 1.33 时的模式干涉型光纤传感器的干涉光谱图，其中，横坐标为波长，纵坐标表示光强，选择观测波长范围为 1 500～1 600 nm。观察光谱图可知，光源经过干涉传感器后，产生了明显的干涉条纹，代表在该波段干涉效应较为明显，且干涉波形较为均匀，若光纤内有多个高阶本征模式参与干涉，就会得到不均匀的干涉谱。在本文的结构参数下，观测波长范围内共存在两个干涉谷，随着折射率的增加，干涉谷会向长波长方向移动，选择 1 517.32 nm 干涉谷 A 进行观察。



（a） HE_{11} 模 （b） HE_{12} 模

图 2 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的模场分布图

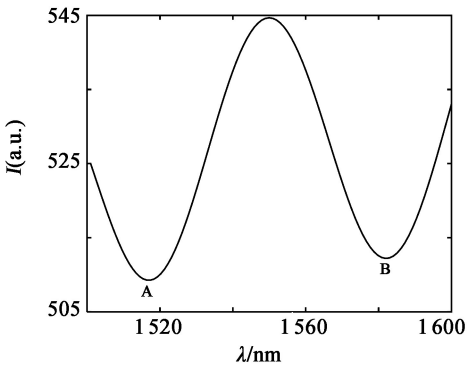


图 3 环境折射率为 1.33 时的干涉谱

为进一步验证本文所提出的结构的灵敏度较传统型干涉型传感器有较大改进的结论，需要通过改变待测环境的折射率来分析不同的干涉谱曲线。为保证所选定观察的干涉谷 A 未移动出观测波长范围，最终确定该结构的可测环境折射率 n_a 范围为 1.33～1.36。

图 4 为不同待测环境折射率下得到的各干涉谱，可以看出，在干涉效应下，随着环境折射率的改变，干涉谷 A 对折射率的变化敏感，发生了一定程度的移动。观察各折射率下的干涉谱，可发现干涉谷 A 对应的波长与待测环境折射率之间基本呈线性关系变化，可以将其拟合为一条直线，如图 5 所示。其中，离散点表示的是波长的变化，而实线则表示与之对应的线性拟合，横坐标为待测环境折射率，纵坐标为干涉谷 A 移动的距离 Δλ。当待测环境折射率由 1.33 变至 1.36 时，干涉谷 A 向长波长方向共移动了 55.4 nm，相较传统模式干涉光纤传感器[10]，其整个测量范围内干涉谷的移动距离变大，折射率响应的灵敏度也随之变大，可达到 1 848.2 nm/RIU（RIU 为单位折射率）。由于一般光谱仪的最小分辨率为 0.05 nm，利用式（5）可计算

得到该传感器的分辨率误差为 2.74×10^{-5} RIU，减小了近一个数量级，极大地优化了传感器性能。

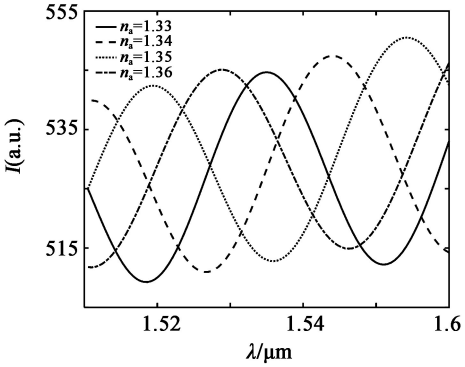


图 4　不同环境折射率下的干涉谱

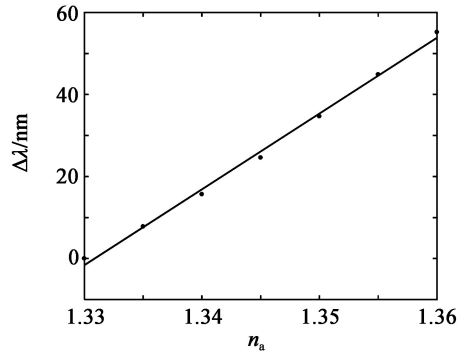


图 5　干涉谷 A 随环境折射率变化的偏移量

3　结论

本文设计了一种基于模式干涉的光纤传感器，该传感器由两段单模光纤同多模光纤连接而成，去掉多模光纤的包层使纤芯裸露在待测环境中，其中，单模光纤和多模光纤拥有相同的直径与相同的纤芯折射率。当入射光从单模光纤耦合到多模光纤时，会激发多模光纤中的基模和高阶模式。在本文的结构参数下仅激发出了 HE_{11} 模和 HE_{12} 模，这两个模式随即会发生稳定的双模干涉，可通过输出单模光纤观测到输出光谱图。当外界待测环境的折射率发生变化时，HE_{11} 模和 HE_{12} 模的有效折射率均会发生改变，输出光谱也会随之改变，具体表现为波谷发生移动，根据该移动量可实现对折射率的测量。根据仿真结果，选取了位于 1 517.32 nm 的干涉谷来进行折射率测量，该干涉谷对折射率的灵敏度为 1 848.2 nm/RIU，分辨率误差仅为 2.74×10^{-5} RIU。该传感器制作简单，具有高灵敏度、低分辨率误差等优点，在环境折射率检测方面有着较好的应用前景。

参考文献：

[1] 杜志泉，倪　峰，肖发新. 光纤传感技术的发展与应用[J]. 光电技术应用，2014，29(6)：7-17.
Du Zhiquan，Ni Feng，Xiao Faxin. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. Electro-optic Technology Application，2014，29(6)：7-17.

[2] 孙　苗. 基于模间干涉的马赫-泽德光纤传感器的研究[D]. 杭州：中国计量学院，2013：24-28.
Sun Miao. Study of modal interferences in Mach-Zehnder fiber sensors[D]. Hangzhou：China Jiliang University，2013：24-28.

[3] 孙　浩. 基于相位调制的干涉型光纤传感器研究[D]. 西安：西北大学，2016：5.
Sun Hao. The optical fiber interferometric sensors based on phase modulation[D]. Xi'an：Northwest University，2016：5.

[4] Wu D，Zhu T，Chiang K S，et al. All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures [J]. Lightwave Technol.，2012，30：805-810.

[5] Li L，Xia L，Xie Z，et al. In-line fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on thinned fiber[J]. Sensors and Actuators A：Phys.，2012，180：19-24.

[6] 韩学文，贾东方，王肇颖. 基于模间干涉原理的少模光纤传感器[J]. 光通信技术，2017，41(4)：35-38.
Han Xuewen，Jia Dongfang，Wang Zhaoying. Few-mode optical fiber sensors based on modal interference principle[J]. Optical Communication Technology，2017，41(4)：35-38.

[7] Wang P，Brambilla G，Ding M，et al. Investigation of single-mode-multimode-single-mode and single-mode-tapered-multi-mode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing[J]. Opt. Soc. Am. B，2011，28(5)：1180-1186.

[8] 温晓东. 基于干涉原理的光纤传感器设计与特性研究[D]. 北京：北京交通大学，2016：24-26.
Wen Xiaodong. Design and characteristic research of the fiber sensors based on interferential principle[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2016：24-26.

[9] Zhang Y，Zhou A，Qin B，et al. Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers[J]. Lightwave Technol.，2014，32(9)：1734-1740.

[10] Wang H，Meng H，Xiong R，et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference [J]. Optic Commun.，2016，364：191-194.

作者简介：

王　钧(1995—)，女，硕士研究生，主要研究方向为光纤干涉传感器。