

文章编号 1004-924X(2014)09-2285-07

## 纤芯失配的光纤 Mach-Zehnder 折射率传感器

傅海威<sup>1,2\*</sup>, 闫旭<sup>1</sup>, 邵敏<sup>1</sup>, 李辉栋<sup>1</sup>, 赵娜<sup>1</sup>

- (1. 西安石油大学理学院光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西西安 710065;  
2. 西北大学物理系, 陕西西安 710069)

**摘要:**基于 Mach-Zehnder 干涉仪原理, 利用光纤错位熔接技术设计并制作了一种单模光纤-多模光纤-单模光纤-错位熔接点-单模光纤结构的液体折射率传感器。传感器中的多模光纤和错位连接部分充当光耦合器; 多模光纤在后面的单模光纤的纤芯和包层中激发出纤芯模和包层模, 不同的模式有不同的模式折射率, 经中间单模光纤传输到错位熔接点处时, 不同模式光之间将产生光程差, 经错位熔接点耦合成为导出光纤的纤芯模从而产生干涉。对该传感器输出的干涉光谱中干涉谷功率随外界溶液折射率变化的规律进行了理论分析和实验研究。结果表明: 溶液折射率变化为 1.358 9~1.392 2 时, 干涉谱中 1 530 nm 附近的干涉谷光功率与溶液折射率呈单调递增关系, 可用于折射率的测量; 折射率变化为 1.372 0~1.392 2 时, 传感器响应曲线具有很好的线性度, 线性拟合系数为 0.998, 对应的灵敏度为 252.06 dB/RIU。该传感器制作简单、结构紧凑、成本低、灵敏度高, 可用于生物医学领域液体折射率的实时测量。

**关键词:** 光纤传感; 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪; 折射率传感器; 光纤失配; 错位熔接

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2285

## Optical fiber core-mismatched Mach-Zehnder refractive sensor

FU Hai-wei<sup>1, 2\*</sup>, YAN Xu<sup>1</sup>, SHAO Min<sup>1</sup>, LI Hui-dong<sup>1</sup>, ZHAO Na<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Photoelectric Oil-Gas Logging and Detecting of the Ministry of Education, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;  
2. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)  
\* Corresponding author, E-mail: hwf@xsyu.edu.cn

**Abstract:** According to the principle of Mach-Zehnder interferometers, an optical in-fiber Mach-Zehnder sensor for Surrounding Refractive Index (SRI) is designed and prepared based on single mode fiber/multimode fiber/single mode fiber/misallied fusion spliced point/single mode fiber structures by misallied fusion spliced technology. The multimode fiber and misallied fusion spliced point in this sensor are served as optical couplers. The light from leading in single mode fiber is coupled into a core mode and cladding modes and propagates in the fiber. Because different modes have different effective refractive indices when the light reaches the misallied fusion spliced point, different modes have different optical path lengths, and the intermodal interference will occur. The dip power of the transmission spectral response to the SRI is theoretically analyzed and experimentally studied. The experimental results show that the dip power at wavelength of 1 530 nm increases monotonically with

收稿日期: 2014-02-24; 修订日期: 2014-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61275088, No. 61077060); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA06Z203); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目 (No. 12JS077)

the SRI in a Refractive Index(RI) range of 1.372 0—1.392 2. Moreover, the response curve of the sensor achieves a good linearity of 0.998 at the RI range of 1.372 0—1.392 2, which is corresponding to a high sensitivity of 252.06 dB/RIU. This compact size, low-cost and highly sensitive SRI sensor is easy to be fabricated, and offers attractive applications in biomedical sensing.

**Key words:** optical fiber sensing; optical fiber Mach-Zehnder interferometer; refractive index sensor; core diameter mismatch; misalliance splicing

## 1 引言

溶液折射率的测量在化学分析、光学测试、生物医学、食品制造与检测等领域有着广泛的应用。测量溶液折射率的方法有很多,如光纤迈克尔逊干涉仪法<sup>[1-2]</sup>、长周期光纤光栅法<sup>[3-6]</sup>、法布里-珀罗干涉仪法<sup>[7]</sup>、闪耀光纤光栅法<sup>[8-9]</sup>、马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)法<sup>[10-12]</sup>等。目前,在这些方法的研究中大多数通过监测传感器获得透射光谱,将给定干涉极值点处的波长因溶液折射率变化而产生的漂移量作为外界折射率变化的量度,而对折射率传感器的输出光功率响应特性的研究很少。然而,在实际折射率传感实验中,随着溶液折射率的变化,传感器透射光谱干涉极值点处的波长和输出光功率是同时发生变化的。从解调技术来讲,功率型检测器件仅需光功率计就可以提取信号,因此研究传感器输出光功率的响应特性是很有意义的。2009年, MIAO 等人用闪耀光纤光栅研究了传感器输出光功率随不同溶液折射率的变化规律<sup>[8]</sup>,实验表明:溶液折射率在 1.372~1.453 变化时,透射光谱的输出光功率由 -2.14 dBm 降到 -3.26 dBm,该传感器的折射率分辨率可以精确到  $10^{-4}$ 。该结构的传感器易于构成传感网络,但是这种折射率传感器具有偏振依赖性<sup>[9]</sup>,因此用该结构的传感器测量折射率时需要在传感系统中引入精确、稳定的偏振控制。2012年, MAY 等人提出了一种由单模光纤-细芯光纤-单模光纤组成的 MZI 与光纤光栅级联的传感器结构,并研究了该传感器透射光谱的输出光功率与溶液折射率之间的关系<sup>[10]</sup>。研究表明:溶液折射率在 1.33~1.41 变化时,传感器的灵敏度为 133.26 dB/RIU。该传感器具有较好的稳定性,但是需严格控制光纤光栅与 MZI 之间的距离,这不仅增加了传感器的

制作难度,还降低了传感器的机械强度。2013年,李辉栋等人用单模光纤-气泡-单模光纤-细芯光纤-单模光纤结构的传感器测量了传感器的透射光谱能量随不同溶液折射率的变化规律,并得到溶液折射率在 1.351~1.402 变化时,传感器的灵敏度为 142.54 dB/RIU 的结果。在该传感结构中,气泡增加了包层模的能量,提高了干涉条纹的对比度,但是该气泡是用氢氟酸制作的,这使得传感器的制作过程具有一定的危险性。因此,研究和制作一种结构简单、制作方便、成本低、灵敏度高、便于解调的光纤传感器是研究人员所追求的目标。

本文基于光纤错位熔接技术提出了一种基于单模光纤-多模光纤-单模光纤-错位熔接点-单模光纤结构的新型 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器,制作了传感器样品,理论分析了传感器的工作原理,并实验研究了折射率的响应特性。该传感器的主要特征是成本低、制作简单、灵敏度较高、便于解调。

## 2 传感器制作及工作原理

传感器结构如图 1 所示,将一段长度约为 600  $\mu\text{m}$  的多模光纤嵌入在单模光纤中,在距多模熔接点约 25 mm 处将两段单模光纤错位连接,错位量为 3  $\mu\text{m}$ 。实验选取长飞公司生产的单模光纤和多模光纤。其中,单模光纤的包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 9  $\mu\text{m}$ ;多模光纤的包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 105  $\mu\text{m}$ 。实验所用的熔接机是古河 S177,并使用安立公司的 MS740A 光谱仪进行在线测量。传感器的制作过程中,首先将多模光纤与第一段单模光纤连接,在显微镜(OLYMPUS SZ2-STU2)下找到单模光纤与多模光纤的熔接节点,将切刀固定在光学调节架上,调节光纤夹持夹可以将切刀的刀口和单模光纤与多模光纤的熔接节点对齐。光学调节架的最小推

进量为  $10\ \mu\text{m}$ ,通过调节光学调节架将多模光纤的长度控制在  $600\ \mu\text{m}$  左右。然后将多模光纤与第二段单模光纤连接。经过多次实验,选用的熔接参数为:首次放电开始强度+100、结束强度+100、预熔时间  $210\ \text{ms}$ 、首次放电时间  $3\ 000\ \text{ms}$ 、再次放电时间  $0\ \text{ms}$ 。然后将两段单模光纤错位连接,错位熔接程序的参数为:首次放电开始强度+85、结束强度+85、预熔时间  $160\ \text{ms}$ 、首次放电时间  $750\ \text{ms}$ 、再次放电时间  $0\ \text{ms}$ 、偏移量  $3\ \mu\text{m}$ 。在多次熔接实验中,单模光纤与多模光纤熔接所产生的损耗的差值以及错位熔接所产生的损耗的差异均在  $0.02\ \text{dB}$  之内,因此,传感器的制作可以达到较为理想的重复性要求。错位量约为  $3\ \mu\text{m}$  时占主导地位的包层模会再次耦合进第三段单模光纤,并与纤芯模发生干涉<sup>[12]</sup>。如图1所示,在第一个熔接节点处形成单模光纤-多模光纤-单模光纤结构。从第一段单模光纤传出的纤芯模光能量到达多模光纤处时,纤芯模光能量的重新分布使一部分光耦合进第二段单模光纤(长度为  $25\ \text{mm}$ )的包层中,一部分光在第二段单模光纤纤芯中继续传播。利用错位熔接技术将第二段单模光纤与第三段单模光纤错位熔接,第二段单模光纤包层中和纤芯中传输的光在错位处耦合进第三段单模光纤纤芯中输出,其中,多模光纤起耦合器的作用。多模光纤长度的微小差别不会改变传感器中发生干涉的主要模式的阶次,故不会对传感器的性能产生影响;但当多模光纤长度改变较大时,则会改变传感器中发生干涉的主要模式的阶次,进而改

变传感器的性能。第二段单模光纤起干涉臂的作用,光在第二段单模光纤中传输时,由于纤芯模与包层模的有效折射率不同,所以纤芯模与包层模在传输过程中产生光程差,从而形成 Mach-Zehnder 干涉。

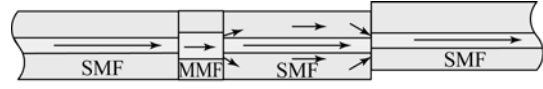


图1 传感器结构和传光原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram and principle of proposed sensor

根据光束干涉理论<sup>[13]</sup>,MZI 的输出光强表示为:

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

式中: $I$ 为输出光强, $I_{\text{core}}$ 和 $I_{\text{cladding}}^m$ 分别为第二段单模光纤内传输的纤芯模和第 $m$ 阶包层模的光强, $L$ 为第二段单模光纤的长度, $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 为纤芯模的有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 为第 $m$ 阶包层模的有效折射率, $\lambda$ 为光在空气中的波长。溶液折射率的变化引起 $I_{\text{cladding}}^m$ 的变化,进而导致光强 $I$ 的变化。因此,通过检测光强 $I$ 的变化,可以解调出溶液的折射率。

对式(1)关于折射率进行求导,得出折射率灵敏度为:

$$\frac{dI}{dRI} = \frac{d \sum_m I_{\text{cladding}}^m(RI)}{dRI} + \sum_m [I_{\text{core}} \cdot I_{\text{cladding}}^m(RI)]^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{I_{\text{core}} \cdot d I_{\text{cladding}}^m(RI)}{dRI} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(RI)] \cdot L\right] + \sum_m \sqrt{I_{\text{core}} \cdot I_{\text{cladding}}^m(RI)} \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(RI)] \cdot L\right] \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot L \cdot \frac{d n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(RI)}{dRI}. \quad (2)$$

由式(2)可以计算出由包层模强度变化所引起的折射率灵敏度。

纤芯模与包层模之间的相位差为:

$$\Delta\varphi = 2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m})L/\lambda. \quad (3)$$

当纤芯模与包层模的相位差 $\Delta\varphi = (2j+1)\pi$ , $j=0,1,2,\dots$ 时,产生的干涉极小值为:

$$\lambda_j = 2(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m})L/(2j+1). \quad (4)$$

随着外界溶液折射率的增加,包层模的有效折射率将增加,而纤芯模的有效折射率不变,由式

(4)可知, $n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 的值减小,因此透射光谱中的干涉极小值点向短波方向漂移。

该传感器在长度不同的干涉臂下的响应光谱如图2所示。实验中发现第二段单模光纤越长,传感器透射光谱中的峰谷数越多;反之,峰谷数越少。实验发现,当第二段单模光纤的长度 $L=25\ \text{mm}$ 时,传感器透射光谱中的峰谷数分布均匀,便于实验测量。

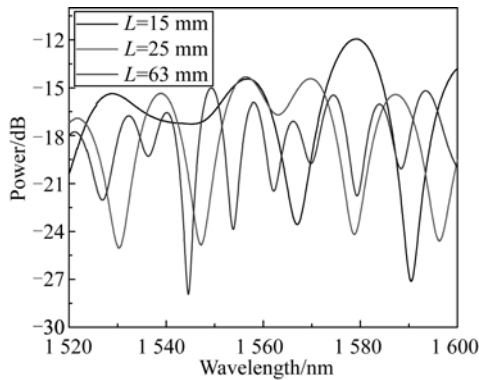


图 2 干涉臂长度不同的传感器透射光谱图

Fig. 2 Transmission spectra of sensor with different lengths of interference arms

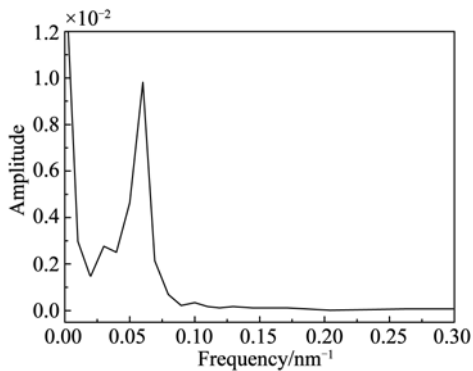
图 3 干涉臂长度  $L=25$  mm 的传感器空间频谱图

Fig. 3 Spatial frequency spectrum of sensor with interference arm length of 25 mm

为了分析透射光谱的模式特征,对图 2 中干涉臂长度  $L=25$  mm 的传感器的透射光谱进行傅

里叶变换,得到的空间频谱图如图 3 所示。空间频率  $\xi$ 、中心波长  $\lambda_0$  与第二段单模光纤长度  $L$  的关系为<sup>[14]</sup>:

$$\xi = \frac{1}{\lambda_0} \Delta m L, \quad (5)$$

其中: $\Delta m$  为模式群折射率差。由式(5)可知,在  $L$  一定的情况下,较高的  $\xi$  对应较高的模式。从图 3 中可以看出,透射光谱的空间频谱图中有 3 个峰,对应 3 个不同阶次的包层模,这 3 个不同阶次的包层模所对应的空间频率分别为 0.03, 0.06 和 0.10  $\text{nm}^{-1}$ , 其中空间频率为 0.06  $\text{nm}^{-1}$  的峰值远大于其它两个空间频率的峰值。因此,图 2 中传感器的透射光谱主要由纤芯模和与空间频率为 0.06  $\text{nm}^{-1}$  相对应的包层模干涉形成。

### 3 实验及讨论

图 4 为实验装置图,实验在室温下进行。为避免传感器发生弯曲,在传感器制作好之后,将传感器拉直并固定在一块载玻片上,然后将载玻片置于光学平台上。实验配置了不同浓度的蔗糖溶液作为折射率样品,每次测量前用阿贝折射率检测仪检测溶液的折射率。测量时将不同浓度的蔗糖溶液滴在传感器上,每次测量后都用无水乙醇反复清洗传感器。实验选择 1530 nm 附近的波谷作为监测对象,改变环境折射率时,记下该波谷处的输出光功率值。

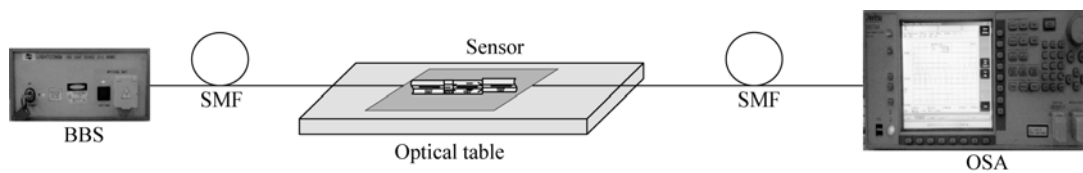


图 4 实验装置

Fig. 4. Schematic diagram of experimental setup

图 5 所示为传感器在不同折射率溶液中的光谱响应。由图可知,当折射率为 1.358 9~1.392 2 时,随着蔗糖溶液折射率的增加,该干涉谷的输出光功率总共增加了 6.34 dB;而在相同的折射率

变化范围内文献[10]中的输出光功率变化了 4.4 dB,文献[11]变化了 4.7 dB,相对而言本文传感器的漂移量较大。此时干涉谷波长向短波方向仅漂移 1.72 nm,该实验现象与理论分析一致。

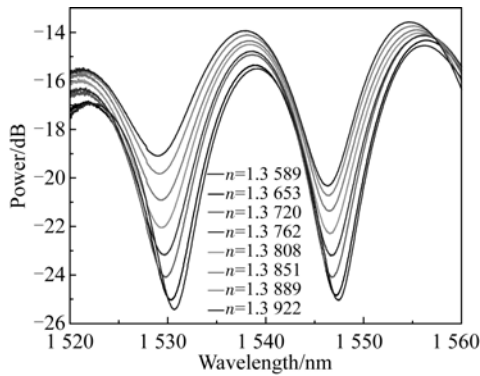


图 5 传感器在不同折射率溶液中的透射光谱  
Fig. 5 Transmission spectra of sensor response to different ambient RIs

实验数据的拟合结果如图 6 所示。由图 6 可知,在折射率为 1.358 9~1.392 2 时,上述干涉极小值点处的输出光功率与溶液折射率有很好的响应关系,相关的拟合系数为 0.996。如图 6 中的插图所示,在折射率为 1.372 0~1.392 2 时,该干涉极小值点处的输出光功率与环境折射率之间有很好的线性关系,线性拟合系数为 0.998,相应的灵敏度为 252.06 dB/RIU。按商用功率计 0.01 dB 的分辨率计,该传感器的折射率分辨率为  $3.9 \times 10^{-5}$ 。

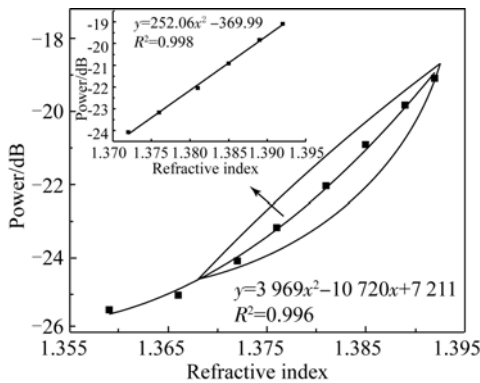


图 6 干涉极小值的输出光功率和环境溶液折射率的变化关系(插图是对环境折射率在 1.372 0~1.392 2 的实验数据进行线性拟合的结果)  
Fig. 6 Attenuation power shifts of sensor with increase of ambient RIs(The insert is linear fits of experiment data with ambient RIs from 1.372 0 to 1.392 2)

表 1 环境折射率测量值和经传感器定标拟合值的对比  
Tab. 1 Comparison between measured ambient RIs and fitted values calibrated by sensor

| 实验数据 | 谷值功率/dB | 折射率     |         | 相对误差/%  |
|------|---------|---------|---------|---------|
|      |         | 拟合值     | 测量值     |         |
| 1    | -24.20  | 1.371 9 | 1.372 1 | 0.014 6 |
| 2    | -22.73  | 1.377 7 | 1.377 4 | 0.021 8 |
| 3    | -21.87  | 1.381 1 | 1.381 4 | 0.021 7 |
| 4    | -20.43  | 1.386 8 | 1.386 5 | 0.021 6 |
| 5    | -19.38  | 1.391 0 | 1.391 2 | 0.014 4 |
| 6    | -18.79  | 1.393 3 | 1.393 5 | 0.014 4 |

为了进一步验证传感器对环境折射率变化的响应特性,本文用甘油配置了折射率不同的待测样品,并测量了该传感器在折射率不同的甘油样品中的响应光谱,如图 7 所示。从传感器响应光谱中读出所监测的 1 530 nm 处的谷值功率,根据传感器定标曲线计算出待测样品的折射率拟合值,并与由阿贝折射率计所测得的折射率测量值进行对比,计算出误差值,结果如表 1 所示。

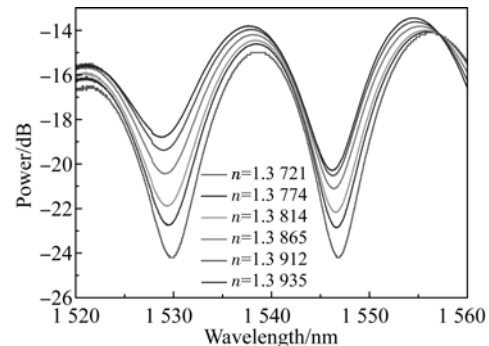


图 7 传感器在不同折射率的甘油溶液中的透射光谱  
Fig. 7 Transmission spectra of sensor response to changed glycerin RIs

根据前文所述,图 2 所示的干涉光谱是由纤芯模和与空间频率为  $0.06 \text{ nm}^{-1}$  相对应的包层模干涉而成,因此将式(1)简化为:

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{cladding}} + 2 \sqrt{I_{\text{core}} \cdot I_{\text{cladding}}} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}) \cdot L \right]. \quad (6)$$

根据双光束干涉理论,由式(6)进一步得出干涉光谱中干涉极小值点处的光强为:

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{cladding}} - 2 \cdot \sqrt{I_{\text{core}} \cdot I_{\text{cladding}}}. \quad (7)$$

对式(7)关于折射率求导,得出折射率灵敏度为:

$$\frac{dI}{d(RI)} = \left(1 - \frac{\sqrt{I_{\text{core}}}}{\sqrt{I_{\text{cladding}}}}\right) \cdot \frac{dI_{\text{cladding}}}{d(RI)}. \quad (8)$$

当外界溶液的折射率增加时,倏逝波穿透深度增加,辐射场增强,导致包层模强度发生衰减,所以  $\frac{dI_{\text{cladding}}}{d(RI)} < 0$ 。通常情况下,纤芯模的强度大

于包层模的强度,所以  $1 - \frac{\sqrt{I_{\text{core}}}}{\sqrt{I_{\text{cladding}}}} < 0$ 。因此,由

式(8)可得  $\frac{dI}{d(RI)} > 0$ ,这说明随外界溶液折射率的增加,传感器透射光谱中干涉极小值点处的输出光功率将会增加。

## 4 结 论

本文设计并制作了一种新型的光纤 Mach-

Zehnder 折射率传感器,并研究了该传感器的输出光功率随外界溶液折射率变化的特征。实验结果表明:当外界溶液折射率为 1.358 9~1.392 2 时,传感器的输出光功率与外界溶液折射率的变化有很好的响应关系,可用于折射率的测量。当折射率为 1.372 0~1.392 2 时,传感器响应曲线具有很好的线性度,线性拟合系数为 0.998,对应的灵敏度为 252.06 dB/RIU。按商用功率计 0.01 dB 的分辨率计,该传感器的折射率分辨率为  $3.9 \times 10^{-5}$ 。该传感器将溶液折射率变化转变为输出干涉光谱中干涉谷功率的变化,通过检测光功率的变化解调出折射率变化的信息,具有制作简单、易于解调,灵敏度高等特点。该传感器应用于传感系统时,不需要昂贵的波长检测器件,降低了检测成本,可在生物医学领域进行液体折射率的实时测量。

## 参考文献:

- [1] MENG H Y, SHEN W, ZHANG G B, *et al.*. Michelson interferometer-based fiber-optic sensing of liquid refractive index[J]. *Sensors and Actuators B*, 2011, 160(1):720-723.
- [2] TIAN ZH B, SCOTT S H, LOOCK H P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(16):1387-1389.
- [3] 赵明富, 韩汐, 罗彬彬, 等. 长周期光纤光栅的折射率梯度响应特性[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2): 316-321.  
ZHAO M F, HAN X, LUO B B, *et al.*. Response characteristics of refractive index gradient based on long-period fiber gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):316-321. (in Chinese)
- [4] QI Y F, GAO X Q, BI W H. Refractive index biosensor based on microstructured optical fiber long-period gratings: a theoretical analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2013, 30(5): 1256-1260.
- [5] HAE Y CH, KWAN S P, BYEONG H L. Photonic crystal fiber interferometer composed of a long period fiber grating and one point collapsing of air holes [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(8): 812-814.
- [6] 童峥嵘, 郭阳, 杨秀峰, 等. 基于多模-单模-多模结构和光纤布拉格光栅同时测量温度和折射率[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(5):921-926.  
TONG ZH R, GUO Y, YANG X F, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on MSM structure combine with FBG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 921-926. (in Chinese)
- [7] GAO R, JIANG Y, DING W H, *et al.*. Filmed extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors for the measurement of arbitrary refractive index of liquid [J]. *Sensors and Actuators B*, 2013, 177:924-928.
- [8] MIAO Y P, LIU B, ZHAO Q D. Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15(3):233-236.
- [9] 陆玉春, 黄卫平, 简水生. 基于闪耀光纤布拉格光栅功率检测折射率的理论分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(4):1153-1157.  
LU Y CH, HUANG W P, JIAN SH SH. Theoretical investigation of power-referenced refractometer based on tilted fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4):1153-1157. (in Chinese)
- [10] MA Y, QIAO X G, GUO T, *et al.*. Reflective fiber-optic refractometer based on a thin-core fiber

- tailored Bragg grating reflection [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(3):323-325.
- [11] 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):214209.
- LI H D, FU H W, SHAO M, *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 Phys. Sin.*, 2013, 62(21):214209. (in Chinese)
- [12] 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.
- TANG CH P, DENG M, ZHU T, *et al.*. Photonic crystal fiber based M-Z interferometer for refractive index measurement [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(9):1304-1308. (in Chinese)
- [13] LI L CH, XIA L, XIE ZH H, *et al.*. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (10): 11109-11120.
- [14] 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.

#### 作者简介:



傅海威(1966—),男,陕西宝鸡人,博士,教授,1996年于西北大学获得硕士学位,2006年于西安交通大学获得博士学位,主要从事光电子学及光纤传感、光电检测、计算电磁场等方面的研究。E-mail: hwf@xsyu.edu.cn



闫旭(1990—),男,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事光电子学及光纤传感技术的研究。E-mail: yanxu\_wuli@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)