基于纤芯失配型马赫-曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器的研究

傅海威[1] 闫 旭[1] 李辉栋[1] 邵 敏[1] 赵 娜[1] 刘钦朋[1] 高 宏[1] 贾振安[1] 乔学光[2]

([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 设计和制作了一种基于单模-多模-细芯-单模光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪结构，可同时测量折射率和温度的传感器。该传感器中，多模光纤和细芯-单模熔接点充当光耦合器。导入光纤中传输的光经多模光纤后在细芯光纤的纤芯和包层中激发出纤芯模和包层模，不同模式光在细芯光纤中传输时将产生光程差，再经细芯-单模熔接点耦合成为导出光纤的纤芯模而干涉。传感器透射光谱随着环境折射率和温度的变化发生漂移，通过监测不同级次的干涉谷可实现折射率和温度的同时测量。通过对传感器的透射光谱进行傅里叶变换分析可知该透射光谱主要由 LP_{01} 模和 LP_{16} 模干涉形成。该传感器透射光谱中 1535 nm 附近干涉谷的折射率和温度响应灵敏度的理论值分别为－55.90 nm/RIU 和 0.0501 nm/℃(其中 RIU 为折射率单位)；1545 nm 附近干涉谷的折射率和温度响应灵敏度的理论值分别为－56.26 nm/RIU 和 0.0505 nm/℃。在折射率和温度的变化范围分别为 1.3449～1.3972 和 20 ℃～90 ℃的环境中对传感器的响应特性进行实验研究，结果表明：透射光谱中 1535 nm 附近干涉谷的折射率和温度响应灵敏度分别为－53.03 nm/RIU 和 0.0465 nm/℃；1545 nm 附近干涉谷的折射率和温度响应灵敏度分别为－54.24 nm/RIU 和 0.0542 nm/℃。理论分析与实验结果相一致。该传感器在生物医学领域有较好的应用前景。

关键词 光纤光学；光纤马赫-曾德尔干涉仪；折射率和温度测量；纤芯失配

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1106001

Study of Fiber Sensor for Simultaneous Measurement of Refractive and Temperature Based on a Core-Mismatch Mach-Zehnder Interferometer

Fu Haiwei[1] Yan Xu[1] Li Huidong[1] Shao Min[1] Zhao Na[1] Liu Qinpeng[1] Gao hong[1] Jia Zhen′an[1] Qiao Xueguang[2]

([1] *Key Laboratory on Photoelectric Oil-Gas Logging and Detecting, Ministry of Education, School of Science, Xi′an Shiyou University, Xi′an, Shaanxi* 710065, *China*
[2] *Department of Physics, Northwest University, Xi′an, Shaanxi* 710069, *China*)

Abstract A fiber-optic Mach-Zehnder interferometer (MZI) based on single-mode -multimode-thin-core-single-mode fiber structure is proposed and demonstrated for measuring refractive index and temperature simultaneously. The multimode fiber (MMF) and the thin core fiber-single mode fiber (TCF-SMF) spliced point serves as mode coupler. When the light is launched into the MMF through the lead-in SMF, at the MMF-TCF spliced point, the core mode and cladding modes are excited and propagate in the core and cladding region of the TCF respectively. The optical path difference can be produced between different modes propagating within the TCF. Then, at the TCF-SMF spliced point, the excited cladding modes coupled back into the core of lead-out SMF interfere with the TCF core mode. When the surrounding refractive index (SRI) and temperature change, the transmission spectrum of the sensor shifts. On this basis, the simultaneous measurement of SRI and temperature can be completed by monitoring the dips

收稿日期： 2014-05-20；**收到修改稿日期：** 2014-06-26

基金项目： 国家自然科学基金(61275088,61077060)、国家 863 计划(2009AA06Z203)

作者简介： 傅海威(1966—)，男，博士，教授，主要从事光电子及光纤传感技术方面的研究。E-mail：hwfu@xsyu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

with different interference orders. The intermodal interference mainly occurs between the core mode LP_{01} and the cladding mode LP_{16} based on a fast Fourier transformation analysis for the transmission spectrum of the sensor. The sensitivities of the sensor response to the change of SRI and temperature are theoretically achieved. The SRI and temperature theoretical sensitivities of the interference dips at 1535 nm and 1545 nm are −55.90 nm/RIU, 0.0501 nm/℃, and −56.26 nm/RIU, 0.0505 nm/℃, respectively, where RIU is refractive index unit. The responses of the sensor are experimentally studied at the SRI range from 1.3449 to 1.3972 and temperature range from 20 ℃ to 90 ℃, and the sensitivities −53.03 nm/RIU, 0.0465 nm/℃ and −54.24 nm/RIU, 0.0542 nm/℃ for the two selected interference orders. The theoretical analysis of the sensor is in good agreement with that obtained in the experiment. This kind of sensor can offer attractive applications in biomedical sensing.

Key words optical fiber; fiber Mach-Zehnder interferometer; refractive index and temperature measurement; core diameter mismatch

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2430

1 引　言

光纤传感器因其抗腐蚀、抗高温、抗电磁干扰、灵敏度高等优点，近年来被广泛用于折射率[1−2]、温度[3−4]、应变[5]、磁场[6]、曲率[7]等多种物理量的测量。其中，环境折射率(SRI)和温度的测量在化学分析、光学研究、生物医学、食品制造与检测等领域有着广泛的应用。目前关于环境折射率和温度传感的研究，大多数论文是通过监测传感器透射光谱中给定干涉极值点处的波长因环境折射率(或温度)变化而产生的漂移量，作为环境折射率(或温度)变化的量度。然而，在实际应用中，环境的折射率和温度总是同时发生着变化，用监测传感器透射光谱干涉极值波长漂移的方法对环境折射率或温度进行测量时，将会给测量结果带来误差。因此，为了保证测量结果的精确，对传感器的折射率和温度同时响应特性研究是很有意义的。文献[8]用错位结构的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)和布拉格光栅(FBG)级联的光纤结构进行了折射率和温度的同时测量，该结构的折射率响应灵敏度为13.76 nm/RIU(RIU 为折射率单位)，温度响应灵敏度为 0.046 nm/℃。文献[9]用一个布拉格光栅与一个经氢氟酸腐蚀形成锥形的布拉格光栅级联的光纤结构实现了折射率和温度的同时测量，实验结果表明：当折射率和温度的变化范围分别在 1.33～1.42 和 20 ℃～80 ℃时，该传感器的折射率和温度响应灵敏度分别为−18.027 nm/RIU 和 0.0098 nm/℃。文献[10]用单模-多模-细芯-单模光纤构成传感器实现了折射率和温度的同时测量，该传感器中多模光纤长度为 25 cm，细芯光纤的长度为 7.256 cm。

以上文献对传感器的折射率和温度响应特性进行了深入且有意义的研究，均是通过先实验后拟合的方法得出传感器对环境折射率和温度变化的响应灵敏度。然而，目前国内外的文献中还没有关于传感器对环境折射率和温度变化同时响应的灵敏度理论值的报道。本文设计和制作了基于单模-多模-细芯-单模光纤结构的 MZI。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。通过理论分析明确了传感器中形成干涉的主要模式，得到了干涉光谱中不同级次的干涉谷对环境折射率和温度的响应灵敏度，理论分析与实验结果基本一致。

2 传感器制作及实验原理

将长度约为 600 μm 的多模光纤(MMF)与长度为 14.5 mm 细芯光纤(TCF)对芯熔接，然后将这一结构嵌入到单模光纤(SMF)中构成图 1 所示的传感器结构。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。实验选取长飞公司所生产的细芯光纤、多模光纤和单模光纤。其中，细芯光纤的纤芯和包层直径分别为 6.5 μm 和 80 μm，细芯光纤的纤芯和包层有效折射率分别为 1.4735 和 1.4585；多模光纤的纤芯和包层直径分别为 105 μm 和 125 μm，多模光纤的纤芯和包层有效折射率分别为 1.4910 和 1.4747；单模光纤的包层直径为 125 μm，纤芯直径为 9 μm。传感器中，由于多模光纤的纤芯直径大于细芯光纤的包层直径，所以导入光纤中传播的光经多模光纤时，将同时在细芯光纤的纤芯和包层中分别激发出纤芯模和包层模，然后细芯光纤中的纤芯模和包层模在细芯-单模熔接点处再次耦合进入单模光纤中输出。细芯光纤起传感臂的作用，光在细芯光纤中传输时，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，从而形成干涉图样，如图 2 所示。根据光束干涉理论[11]，MZI 的输出光强可以表示为

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

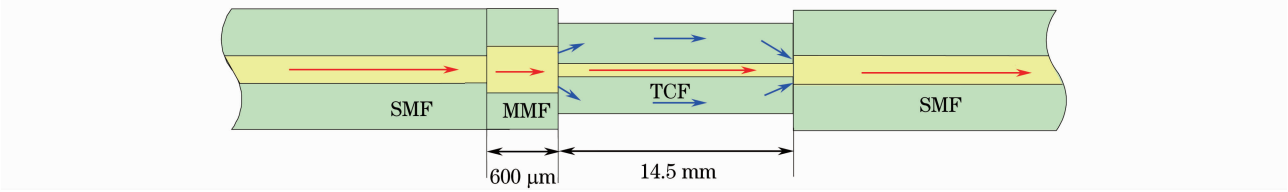

图 1 传感器结构和传光原理示意图

Fig. 1 Schematic configuration and principle of the proposed sensor

式中 I 为输出光强，I_{core} 和 $I_{\mathrm{cladding}}^{m}$ 分别为细芯光纤内传输的纤芯模和第 m 阶包层模光强，L 为细芯光纤的长度，$n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{core}}$ 为纤芯模有效折射率，$n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cladding},m}$ 为第 m 阶包层模的有效折射率。λ 是光在空气中的波长。

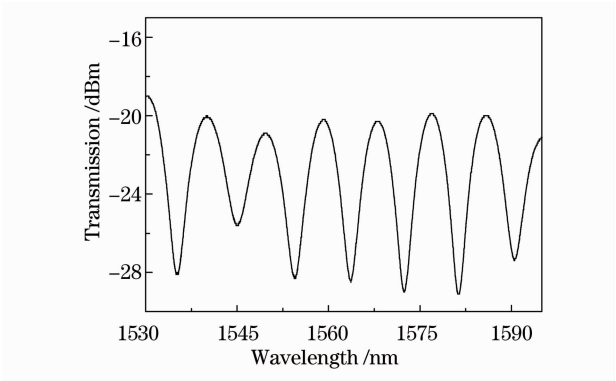

图 2 传感器的透射光谱图

Fig. 2 Transmission spectrum of the sensor

为了分析该传感器透射光谱的模式特征，对图 2所示的透射光谱进行傅里叶变换，如图 3 所示。空间频率 ξ、中心波长 λ_0 与细芯光纤长度 L 关系如下[12]：

$$\xi = \frac{1}{\lambda_0^2}\Delta m L, \tag{2}$$

$$\Delta m = \Delta n - \lambda_0 \frac{\partial}{\partial \lambda}\Delta n, \tag{3}$$

式中 Δm 为模式群折射率差，由(2)式可知，在细芯光纤长度 L 一定的情况下，较高的空间频率 ξ 对应较高的模式。从图3中可以看出，在空间频率为

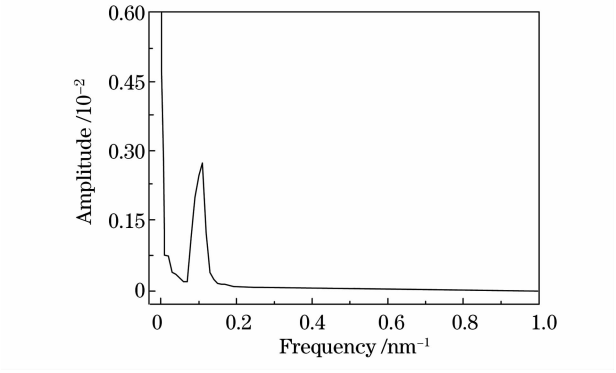

图 3 传感器的空间频谱图

Fig. 3 Spatial frequency spectrum of the sensor

0.11 nm^{-1}处有一个明显的主峰，由于该主峰的峰值远大于其他次峰峰值，所以图 2 所示的传感器透射光谱主要由纤芯模和与空间频率为 0.11 nm^{-1}相对应的包层模干涉形成。

为了进一步确定在干涉中起主导作用的包层模的阶次，利用有限元法(商用软件 optical fiber 2.0)仿真计算出不同阶次的包层模因环境折射率变化而产生的 Δn 和$\frac{\partial}{\partial \lambda}\Delta n$，取中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm，进一步由(3)式可以确定出细芯光纤中的不同包层模所引起的模式群折射率差 Δm_1。取空间频率 $\xi = 0.11\ \mathrm{nm}^{-1}$，中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm，细芯光纤长度测得 $L = 14.5$ mm，将上述参数代入(2)式得到在图 2 所示传感器透射光谱中起主导作用的包层模所引起的模式群折射率差 Δm_2。通过 Δm_1 与 Δm_2 对比可以确定出起主导作用的包层模的阶次，对比结果如表 1 所示。

表 1 模式群折射率差的理论值与实验值的对比

Table 1 Measured values of Δm versus the theoretical values

Mode	LP_{07}	LP_{09}	LP_{13}	LP_{15}	LP_{16}	LP_{17}	LP_{19}
Δn	0.013468	0.013723	0.009778	0.011382	0.012356	0.013955	0.017003
$\lambda_0 \frac{\partial}{\partial \lambda}\Delta n$	0.002767	0.002309	−0.003510	−0.003950	−0.006200	−0.007330	−0.009460
Δm_1	0.010701	0.011423	0.013288	0.015332	0.018556	0.021285	0.026463
Δm_2	0.018226	0.018226	0.018226	0.018226	0.018226	0.018226	0.018226

如表 1 所示，经数值模拟计算得出的 LP_{16} 模引起的模式群折射率差与实验分析得出的模式群折射率差的相对误差非常小，因此可以推断该传感器透射光谱主要由 LP_{01} 模和 LP_{16} 模干涉形成。

纤芯模与包层模之间的相位差可以表示为

$$\Delta\phi = 2\pi(n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{core}} - n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cladding},m})L/\lambda. \tag{4}$$

当纤芯模与包层模的相位差 $\Delta\phi$ 满足 $\Delta\phi=(2j+1)\pi$，$j=0,1,2,3,\cdots$时，将产生干涉极小值：

$$\lambda_j = \frac{2(n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{core}} - n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cladding},m})L}{2j+1}. \tag{5}$$

当环境温度保持不变，随着环境折射率的增加(或减小)，细芯光纤中包层模的有效折射率将会相应地增加(或减小)。将(5)式对折射率求导可得

$$\frac{\partial\lambda_j}{\partial n} = -\frac{2L}{2j+1}\cdot\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cladding},m}}{\partial n}, \tag{6}$$

式中由于$\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cladding},m}}{\partial n}>0$，所以$\frac{\partial\lambda_j}{\partial n}<0$，因此传感器干涉谱中干涉谷处的波长随着环境折射率的增加向短波方向漂移，不同级次的干涉谷对环境折射率的响应灵敏度不同。由(6)式可知，传感臂的长度和包层模阶次也是决定传感器灵敏度的重要因素。在传感臂长度一定的情况下，包层模阶次越高，则$\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cladding},m}}{\partial n}$的值越大，传感器灵敏度越高。

将(5)式和(6)式联立，并根据表 2 所示的 LP_{16} 模在不同环境折射率溶液中的有效折射率可以计算出传感器透射谱中 1535 nm 附近的波谷(谷 1)和 1545 nm附近的波谷(谷 2)对环境折射率变化的响应灵敏度分别为−55.90 nm/RIU 和−56.26 nm/RIU。

表 2　LP_{16} 模在不同环境折射率溶液中的有效折射率

Table 2　Effective refractive indexes of the cladding mode LP_{16} under different values of SRI

Refractive index	$n_{\mathrm{eff}}^{LP_{16}}$
1.3449	1.4551159
1.3588	1.4551207
1.3701	1.4551252
1.3810	1.4551306
1.3889	1.4551354
1.3972	1.4551411

在环境折射率保持不变的情况下，当环境温度变化时，由于热膨胀效应和热光效应，细芯光纤的长度、模式有效折射率都将发生变化。当温度变化 ΔT，细芯光纤的长度和模式有效折射率的变化可以表示为[13]

$$L(T) \approx L(T_0)(1+\alpha_{\mathrm{s}}\Delta T), \tag{7}$$

$$\Delta n(T) \approx \Delta n(T_0) + \frac{\partial\Delta n}{\partial T}\Delta T, \tag{8}$$

式中 $\alpha_{\mathrm{s}}=5.5\times10^{-7}$ (℃)$^{-1}$ 为光纤的热膨胀系数，$\Delta n(T_0)$ 和 $\Delta n(T)$ 是环境温度分别为 T_0 和 T 时 $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{core}} - n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cladding},m}$ 的值，其中，$\Delta n(T_0)=1.2555\times10^{-2}$，$L(T_0)$ 和 $L(T)$ 是环境温度分别为 T_0 和 T 时细芯光纤的长度。将(7)式代入(1)式可得传感器干涉谱随温度的变化：

$$I = I_{\mathrm{core}} + \sum_m I_{\mathrm{cladding}}^m + \sum_m 2\cdot\sqrt{I_{\mathrm{core}}\cdot I_{\mathrm{cladding}}^m}\cdot\cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}\left[\Delta n(T_0) + \frac{\partial\Delta n}{\partial T}\Delta T\right]\cdot L(T_0)(1+\alpha_{\mathrm{s}}\Delta T)\right\}, \tag{9}$$

细芯光纤中纤芯模和包层模的相位差可以表示为

$$\Delta\phi_{\mathrm{T}} = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{\left[\Delta n(T_0) + \frac{\partial\Delta n}{\partial T}\Delta T\right]\cdot L(T_0)(1+\alpha_{\mathrm{s}}\Delta T)\right\}, \tag{10}$$

当纤芯模与包层模的相位差 $\Delta\phi$ 满足 $\Delta\phi=(2j+1)\pi$，$j=0,1,2,3,\cdots$时，将产生干涉极小值：

$$\lambda_j = \frac{2}{(2j+1)}\left\{\left[\Delta n(T_0) + \frac{\partial\Delta n}{\partial T}\Delta T\right]\cdot L(T_0)(1+\alpha_{\mathrm{s}}\Delta T)\right\}, \tag{11}$$

将(10)式对温度求导可得：

$$\frac{\partial\lambda_j}{\partial T} = \frac{2}{(2j+1)}\left[\Delta n(T_0)\cdot L(T_0)\cdot\alpha_{\mathrm{s}} + \frac{\partial\Delta n}{\partial T}\Delta T\cdot L(T_0)\cdot(1+2\alpha_{\mathrm{s}}\Delta T)\right]. \tag{12}$$

细芯光纤中纤芯和包层的热光系数分别为 1.00198×10^{-5} (℃)$^{-1}$ 和 0.99178×10^{-5} (℃)$^{-1}$，利用有限元法(商用软件 optical fiber 2.0)仿真计算出实验所用的细芯光纤的$\frac{\partial\Delta n}{\partial T}=4.1\times10^{-7}$ (℃)$^{-1}$，通过联立(11)式和(12)式，可以计算出谷 1 和谷 2 对环境温度变化的响应灵敏度分别为 0.0501 nm/℃ 和 0.0505 nm/℃。

由(6)式和(12)式可知，传感器透射光谱中不同级次的干涉条纹对环境折射率和温度变化的响应灵敏度不同。因此，将不同级次的干涉谷对环境折射率和温度的响应灵敏度组成灵敏度系数矩阵。当环境的折射率和温度同时发生变化时，根据灵敏度系数矩阵实现折射率和温度的同时测量。传感器的灵敏度系数矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{m1}\\ \Delta\lambda_{m2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial\lambda_{m1}}{\partial n} & \frac{\partial\lambda_{m1}}{\partial T}\\ \frac{\partial\lambda_{m2}}{\partial n} & \frac{\partial\lambda_{m2}}{\partial T}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta n\\ \Delta T\end{bmatrix}. \tag{13}$$

3 实验及结果分析

3.1 折射率实验

图 4 为实验装置图，为避免传感器发生弯曲，传感器制作好之后，将传感器拉直，固定在一块载玻片上，然后将载玻片置于光学平台之上。实验配置了不同浓度的蔗糖溶液作为折射率样品。实验选择谷 1 和 1 谷 2 作为监测对象，保持温度恒定，当环境折射率变化时，传感器在不同折射率溶液中的光谱响应如图 5 所示。图 5 表明，在 1.3449～1.3972 的折射率变化范围内，随着蔗糖溶液折射率的增加，谷 1 和谷 2 向短波方向发生漂移。对实验数据进行拟合，结果如图 6 所示。谷 1 和谷 2 对环境折射率的响应灵敏度分别为－53.03 nm/RIU 和－54.24 nm/RIU。将经理论计算得到的折射率响应灵敏度与实验拟合得到的折射率响应灵敏度进行对比发现理论值与实验值的相对误差为 5.13%和 3.59%。

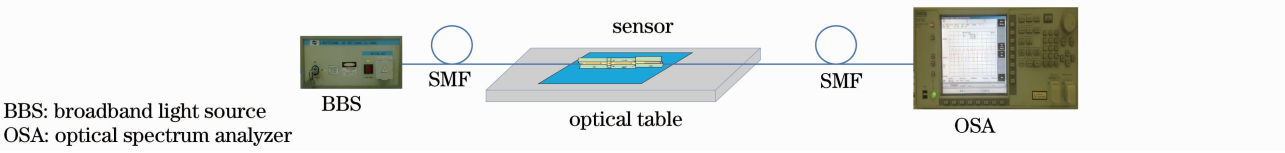

图 4 实验装置

Fig. 4 Schematic illustration of the experimental setup

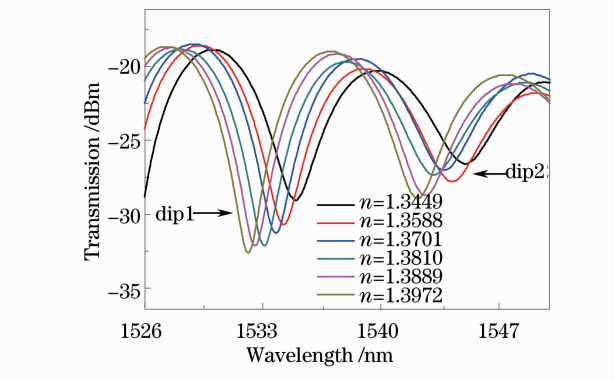

图 5 传感器在不同环境折射率溶液中的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra of the sensor under different values of SRI

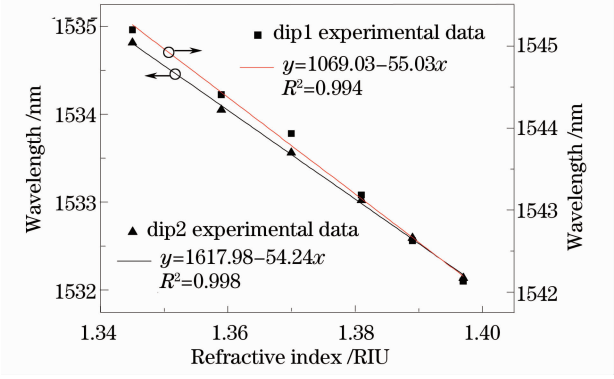

图 6 不同级次干涉谷波长和环境折射率溶液的变化关系

Fig. 6 Wavelength of the dips with different interference orders versus the SRI

3.2 温度实验

将传感器拉直，悬挂在水域箱中，水面没过传感器。依旧选择谷 1 和谷 2 作为监测对象，将水浴箱由 20 ℃加热到 90 ℃，每过 10 ℃记录一次传感器对温度变化的响应，如图 7 所示。图 7 表明，在 20 ℃～90 ℃的温度变化范围内，随着环境温度的升高，谷 1 和谷 2 向长波方向发生漂移，漂移量分别为 3.622 nm 和 4.111 nm，对实验数据进行拟合，结果如图 8 所示，谷 1 和谷 2 对环境温度的响应灵敏度分别为 0.0519 nm/℃和 0.0597 nm/℃。

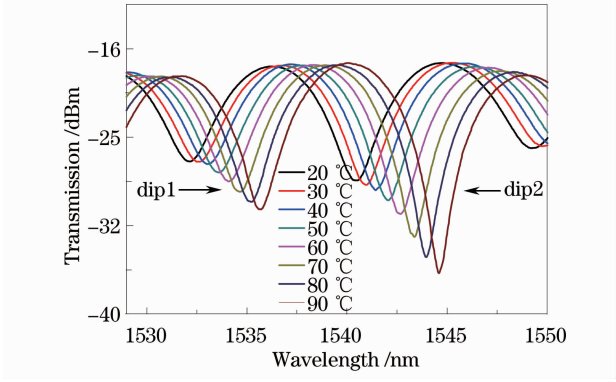

图 7 传感器在不同温度下的透射光谱

Fig. 7 Transmission spectra of the sensor under different values of temperature

随着温度的升高，水的折射率变小。因此，图 7 为环境温度和折射率同时变化时传感器的响应光谱图。根据文献[10]研究表明传感器对环境的温度响

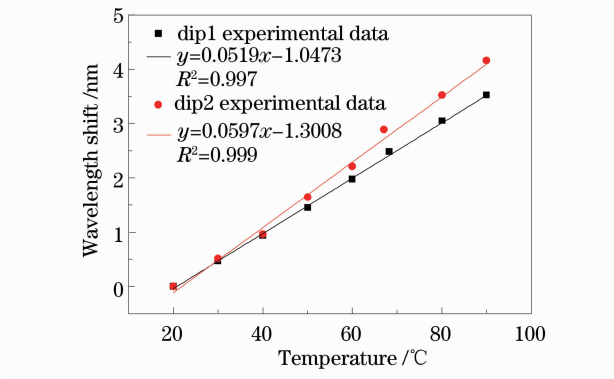

图 8　不同级次干涉谷的波长和环境温度的变化关系

Fig. 8　Wavelength of the dips with different interference orders versus the surrounding temperature

应灵敏度可以表示为

$$k = k_{\mathrm{T}} + k_{\mathrm{RI}} \times R_{\mathrm{RI,T}}, \tag{14}$$

式中 k_{T} 和 k_{RI} 为环境温度和折射率单独变化时对应的传感器响应灵敏度。$R_{\mathrm{RI,T}}$ 是液体折射率温度系数。根据文献[14]的研究表明水的折射率温度系数 $R_{\mathrm{RI,T}}=1.02\times10^{-4}$。因此，根据(14)式可以计算出传感器透射光谱中谷 1 和谷 2 对环境温度的响应灵敏度分别为 0.0465 nm/℃ 和 0.0542 nm/℃。谷 1 和谷 2 对温度响应的理论值与实验值之间的相对误差分别为 7.19% 和 7.33%。

环境温度和折射率同时发生变化时，将谷 1 和谷 2 对折射率和温度的响应灵敏度代入(13)式，可以将谷 1 和谷 2 的波长漂移量表示为

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{m1}\\ \Delta\lambda_{m2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-53.03 & 0.0465\\ -54.24 & 0.0542\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta n\\ \Delta T\end{bmatrix}. \tag{15}$$

将(15)式中的灵敏度系数矩阵进行转置，通过测量不同级次的干涉谷的漂移量实现环境折射率和温度的同时测量，即

$$\begin{bmatrix}\Delta n\\ \Delta T\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.1539 & 0.1320\\ -154.03 & 150.60\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{m1}\\ \Delta\lambda_{m2}\end{bmatrix}. \tag{16}$$

4　结　　论

利用单模-多模-细芯-单模光纤结构可同时测量环境折射率和温度，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。通过理论分析明确了传感器中形成干涉的主要模式，得到了干涉光谱中不同级次的干涉谷对环境折射率和温度的响应灵敏度，理论分析结果与实验现象一致。用该传感器测量环境折射率和温度时，可消除折射率和温度之间的交叉影响。该传感器在生物医学领域有较好的应用前景。

参　考　文　献

1 Chen Yaofei, Han Qun, He Yang, *et al*.. Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905001.
陈耀飞，韩　群，何　洋，等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. 中国激光，2013，40(9)：0905001.

2 Liu Zhibo, Tan Zhongwei, Yin Bin, *et al*.. Refractive index sensing characterization of a singlemode-claddingless-singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser [J]. Opt Express, 2014, 22(5): 5037－5042.

3 Ma Yue, Qiao Xueguang, Guo Tuan, *et al*.. Temperature-independent refractive index measurement based on Fabry-Perot fiber tip sensor modulated by Fresnel reflection [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(5): 050603.

4 Liao Guozhen, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al*.. All-fiber temperature sensor based on grapheme [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍，张　军，蔡　祥，等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. 光学学报，2013，33(7)：0706004.

5 Jiang Ying, Zeng Jie, Liang Dakai, *et al*.. Influence of birefringence on axial strain sensitivity of birefringence fiber loop mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1106001.
江　莺，曾　捷，梁大开，等. 双折射率对双折射光纤环境轴向应变灵敏度的影响[J]. 光学学报，2013，33(11)：1106001.

6 Dai Yutang, Zhou Guangfu, Li Tao, *et al*.. Fiber optic magnetic field sensor based on femtosecond laser micromachining [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1206001.
戴玉堂，周广福，李　涛，等. 基于飞秒激光微加工的光纤磁场传感器[J]. 光学学报，2013，33(12)：1206001.

7 Gong Yuan, Zhao Tian, Rao Yunjiang, *et al*.. All-fiber curvature sensor based on multimode interference [J]. IEEE Phonton Technol Lett, 2011, 23(11): 679－681.

8 Yao Qiqi, Meng Hongyun, Wang Wei, *et al*.. Simultaneous measurement of refractive index and temperaturebased on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating [J]. Sensors Actuators A, 2014, 209: 73－77.

9 Zhao Chunliu, Qi Liang, Zhang Shuqin, *et al*.. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a partial cone-shaped FBG [J]. Sensors Actuators B, 2013, 178: 96－100.

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

11 Li Huidong, Fu Haiwei, 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(2): 0214209.
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(2)：0214209.

12 Hae Young Choi, Myoung Jin Kim, Byeong Ha Lee. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. Opt Express, 2007, 15(9): 5711－5720.

13 Gianluca Coviello, Vittoria Finazzi, Joel Villatoro. Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000 ℃ [J]. Opt Express, 2009, 17(24): 21551－21559.

14 Yan Jinhua, A P Zhang, Shao Liyang, *et al*.. Simultaneous measurement of refractive index and temperature by using dual long-period gratings with an etching process [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(9): 1360－1361.

栏目编辑：王晓琰