

# 基于纤芯失配与错位熔接的光纤 Mach-Zehnder 温度折射率双参量传感器

宗书尧<sup>1</sup>, 文晓艳<sup>1\*</sup>, 张东生<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 武汉理工大学理学院, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup> 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

**摘要** 介绍了一种基于纤芯失配与错位熔接的光纤 Mach-Zehnder 干涉仪, 实现了折射率-温度双参量传感。将带有凸锥结构的多模光纤段与错位熔接接头作为两个耦合单元, 其中凸锥结构增加了包层模式能量, 提高了传感器透射谱对比度。改变外界环境折射率和温度, 通过监测透射谱中两个波谷的特征波长漂移量, 建立传感矩阵。实验结果表明, 在折射率为 1.3449~1.3797、温度为 25~65 °C 的范围内, 折射率和温度灵敏度分别为 -25.682 nm/RIU (RIU 为单位折射率) 和 0.073 nm/°C。本传感器具有制作简单、成本低等特点, 在温度、折射率等多参数检测方面具有应用前景。

**关键词** 光纤光学; Mach-Zehnder 干涉仪; 纤芯失配; 错位熔接; 折射率; 温度

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.170607

## Mach-Zehnder Interferometer Based on Fiber Core Mismatch and Core-Offset Splicing for the Simultaneous Sensing of Temperature and Refractive Index

Zong Shuyao<sup>1</sup>, Wen Xiaoyan<sup>1\*</sup>, Zhang Dongsheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup> National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** A Mach-Zehnder interferometer based on fiber core mismatch and core-offset splicing is proposed and experimentally tested for the simultaneous measurement of refractive index and temperature. The sensor structure consists of a multi-mode fiber segment with an up-taper structure and a core-offset joint as two coupled units. The up-taper increases the light energy propagating in the fiber cladding, which improves the fringe visibility. Wavelength shifts were recorded for two transmission dips, associated with variations in the temperature and refractive index, respectively, to build up a sensing matrix for the device. The experimental results show that the sensitivities to changes in the refractive index and temperature are -25.682 nm/RIU and 0.073 nm/°C within the refractive-index range 1.3449–1.3797 and temperature range 25–65 °C. The proposed sensor is easy to fabricate and has low cost, so we believe that it has application prospects for various types of multi-parameter detection, including temperature, refractive index, etc.

**Key words** fiber optics; Mach-Zehnder interferometer; fiber core mismatching; core-offset splicing; refractive index; temperature

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 280.4788

收稿日期: 2019-12-18; 修回日期: 2020-01-09; 录用日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(11974266, 11704293)、中央高校基本科研基金(WUT2019IB014, WUT2018IB008)

\* E-mail: wenxy@whut.edu.cn

170607-1

# 1 引言

折射率的检测在环境评估、生物分析、化学工业、食品加工和临床检验等领域有重要的作用<sup>[1]</sup>。由于光纤类传感器具有抗电磁干扰、尺寸小、耐腐蚀以及远距离传感等诸多优点,这类传感器受到了广泛的关注<sup>[2]</sup>。目前已有文献报道了利用布拉格光纤光栅(FBGs)<sup>[3-5]</sup>、长周期光纤光栅(LPFBGs)<sup>[6-8]</sup>、光子晶体光纤(PCFs)<sup>[9-11]</sup>等制作的温度及折射率传感器。然而,基于光栅的传感器需要昂贵的制造设备,包括相位掩模板及激光光源。而基于 PCFs 的传感器需要经过特殊设计且 PCF 的价格昂贵。近年来,马赫-曾德尔干涉仪(MZI)由于其价格低廉、易于制造,且易集成在单根光纤上的特点而被大量研究。MZI 折射率传感器的结构形式多种多样,可以通过光纤锥<sup>[12-13]</sup>、纤芯失配<sup>[14-15]</sup>、错位熔接<sup>[16]</sup>等方法制作而成。

由于热光效应以及热膨胀效应,传感器本身会对温度产生响应,且温度的改变也会影响折射率的大小,这势必会对折射率的测量带来干扰。因此,同时对温度、折射率这两种物理量进行监测是非常必要的。Zhang 等<sup>[17]</sup>利用单模光纤(SMF)与无芯光纤(NCF)制作了一种 SMF-NCF-SMF (SNS) 的 MZI 传感器,并与 FBG 串联,实现了温度折射率双参量传感。其中 FBG 只对温度敏感,故将其作为温度补偿单元。Rong 等<sup>[18]</sup>基于 SMF 与氢氟酸腐蚀后的多模光纤(MMF)设计了一种 SMF-MMF-SMF (SMS) 的 MZI 结构,并将其与 FBG 串联制成复合传感器。传感器的 SMS 部分对折射率敏感,FBG 部分对温度敏感。Li 等<sup>[19]</sup>提出了一种由 LPFBG 和 S 型光纤锥串联而成的传感结构,实现了对温度

和折射率的同时测量。Chen 等<sup>[20]</sup>将 SMS 与 SNS 结构串联,实现了温度与折射率的同时测量,其中 SMS 仅对温度变化敏感而对折射率变化无响应,SMS 结构用来补偿温度对折射率测量的影响。上述研究需要单独制造具有特定波长的传感结构,制作工序复杂,成本较高。

本文提出了一种基于纤芯失配与错位熔接的光纤 MZI 传感器。通过监测两个波谷的特征波长漂移量并构建传感矩阵,实现了温度、折射率的双参量传感。实验结果表明,两个波谷在 1.3449~1.3797 折射率范围的折射率灵敏度为 0 nm/RIU, -25.682 nm/RIU (RIU 为单位折射率),在 25~65 °C 范围内的温度灵敏度分别为 0.073 nm/°C, 0.064 nm/°C。通过构建传感矩阵进行运算,可获得温度、折射率双参量数据。该传感器仅用单模和多模光纤制作,总长度小于 45 mm,在一根光纤上实现了温度、折射率双参量测量,并可解决温度折射率交叉敏感问题。传感器结构简单,易于制造。相对于利用光子晶体光纤、光纤布拉格光纤光栅、长周期光纤光栅等制作的传感器,所提传感器成本低廉,在物理、化学、生物等传感领域具有潜在的应用价值。

## 2 传感器制作及理论分析

### 2.1 凸锥结构的能量仿真

图 1 为传感器结构示意图。沿着光的传播方向,传感器依次包含 5 个部分:输入 SMF、带有凸锥结构的 MMF、剥去涂覆层的 SMF、SMF 错位熔接头(两段 SMF 错位熔接而成)以及输出 SMF。其中,带有凸锥结构的 MMF 和 SMF 错位熔接头用作传感器的两个耦合单元,剥去涂覆层的 SMF 作为传感单元。

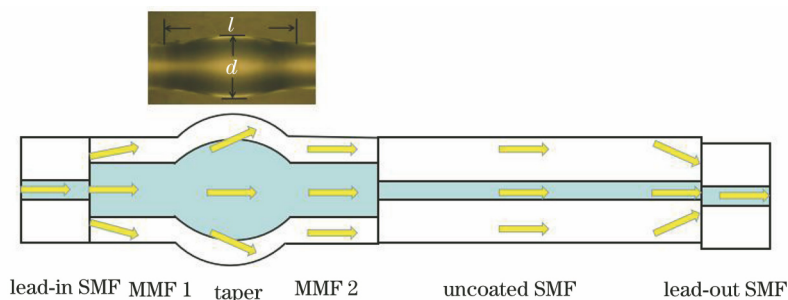


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensing structure

利用有限差分光束传播法(FD-BPM)对无凸锥结构/带凸锥结构的 MMF 和传感 SMF 熔接面(即 MMF2 与 Uncoated SMF 的熔接面)处的能量分布

进行仿真,得到传感 SMF 纤芯区域的对应能量。仿真参数如下:SMF 的纤芯、包层直径分别为 8.2  $\mu\text{m}$ 、125  $\mu\text{m}$ ,纤芯、包层折射率分别为 1.4682、

1.4628;MMF 的纤芯、包层直径分别为  $105\ \mu\text{m}$ 、 $125\ \mu\text{m}$ ,纤芯、包层折射率分别为 1.4446、1.4271。输入 SMF 长度为  $1\ \text{mm}$ 。对于无凸锥结构的 MMF,设置 MMF 长度为  $4\ \text{mm}$ 。对于有凸锥结构的 MMF,设置凸锥位于 MMF 段的中间位置,MMF1 和 MMF2 的长度为  $2\ \text{mm}$ 。

分别计算了无锥以及不同锥区直径  $d$ 、锥区长度  $l$  下传感 SMF 纤芯区域的能量。仿真结果如

表 1 不同锥区直径  $d$  下传感 SMF 纤芯区域归一化光功率随锥区长度  $l$  的变化

Table 1 Normalized optical power of the sensing SMFs with different  $d$  in core region and  $l$

$d/\mu\text{m}$	Normalized optical power					
	$l=368\ \mu\text{m}$	$l=372\ \mu\text{m}$	$l=376\ \mu\text{m}$	$l=380\ \mu\text{m}$	$l=384\ \mu\text{m}$	$l=388\ \mu\text{m}$
163	0.276	0.275	0.279	0.286	0.290	0.291
170	0.281	0.274	0.276	0.290	0.305	0.325
178	0.306	0.315	0.317	0.314	0.312	0.299

表 2 不同锥区长度  $l$  下传感 SMF 纤芯区域归一化光功率随锥区直径  $d$  的变化

Table 2 Normalized optical power of the sensing SMFs with different  $l$  in core region and  $d$

$l/\mu\text{m}$	Normalized optical power					
	$d=163\ \mu\text{m}$	$d=166\ \mu\text{m}$	$d=169\ \mu\text{m}$	$d=172\ \mu\text{m}$	$d=175\ \mu\text{m}$	$d=178\ \mu\text{m}$
368	0.276	0.288	0.281	0.282	0.304	0.306
376	0.279	0.288	0.273	0.287	0.309	0.317
388	0.291	0.285	0.321	0.326	0.312	0.299

## 2.2 传感原理

由宽带光源 (ASE) 发出的信号光通过输入 SMF 进入传感结构。光经过 MMF 后,由于芯径不匹配,当光传输至去涂覆层的 SMF 时,一部分光进入包层传输,包层模式被激发,另一部分光仍在纤芯中传输。在传输一段距离后,由于模式有效折射率之间存在差别,积累了相位差,在经过错位熔接点时相遇并发生干涉。

由干涉理论可知,MZI 的输出谱能量可表示为<sup>[22]</sup>

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}} + 2\sqrt{I_{\text{core}}I_{\text{clad}}}\cos(\phi_0 + \Delta\phi), \quad (1)$$

式中: $I$ 、 $I_{\text{core}}$ 和  $I_{\text{clad}}$  分别为传输谱总强度、参与干涉的纤芯模式强度和包层模式强度; $\phi_0$  是初始相位,本文假设其值为 0; $\Delta\phi$  是纤芯模式与包层模式之间积累的相位差,表达式为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{k\text{-clad}})}{\lambda} = \frac{2\pi L\Delta n_{\text{eff}}^k}{\lambda}, \quad (2)$$

其中  $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  和  $n_{\text{eff}}^{k\text{-clad}}$  分别为纤芯模式和第  $k$  阶包层模式的有效折射率, $\Delta n_{\text{eff}}^k$  表示两者之间的有效折射率差, $L$  为干涉长度, $\lambda$  为波长。在  $\lambda = \lambda_0$ ,即中心波长处,用一阶泰勒展开式进行展开,展开式为

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi L\Delta n_{\text{eff}}^k}{\lambda_0} - \frac{2\pi L\Delta n_{\text{eff}}^k(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0^2}. \quad (3)$$

表 1、表 2 所示。无凸锥结构时,传感 SMF 纤芯区域的归一化能量为 0.334。有凸锥结构时,不同锥区直径、不同锥区长度下传感器的传感 SMF 纤芯区域内的归一化能量都小于 0.334。这是因为凸锥的存在导致光通过凸锥后的发散角变大,使得更多的光进入传感 SMF 的包层中传播,故纤芯内的能量相应减小。传感 SMF 芯层与包层中的能量差异缩小,有利于干涉信号对比度的提升<sup>[21]</sup>。

本研究通过追踪干涉波谷位置来实现传感。波谷对应的  $\Delta\phi$  为

$$\Delta\phi = (2i + 1)\pi, \quad (4)$$

其中  $i$  为整数,第  $i$  级干涉谷波长可表示为

$$\lambda_i = 2\lambda_0 - \frac{(2i + 1)\lambda_0^2}{2L\Delta n_{\text{eff}}^k}. \quad (5)$$

因此,两相邻干涉谷之间的间隔可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}}^k = \frac{\lambda_0^2}{\Delta n_{\text{eff}}^k L}. \quad (6)$$

由(6)式可知,当中心波长  $\lambda_0$  及传感光纤长度一定时,两干涉谷间的间隔由  $\Delta n_{\text{eff}}^k$  决定。对于本文中的 MZI 结构,在传感 SMF 中有不同的包层模式被激发,并参与干涉。因此透射谱是由多个包层模式与基模干涉后叠加而成,包含有多种干涉成分。而不同的包层模式对外界的响应又存在差异<sup>[23]</sup>,因此不同干涉成分会对环境变化表现出不同的响应。

## 3 传感性能测试及分析

### 3.1 实验装置与传感器光谱分析

实验装置图如图 2 所示。将传感器固定在载玻片上,使其处于伸直状态。采用 ASE 光源和光谱仪 (YOKOGAWA AQ6370B) 进行传感性能测试。传

感器由商业熔接机(FSM-60S, Fujikura)制作。首先,将输入 SMF 与 MMF1 通过自动熔接程序进行熔接。接着,将 MMF2 与长度为 41 mm 去除涂覆层的传感 SMF 进行熔接。然后,将两段 MMF 进行过度熔接,形成凸锥结构。过度熔接的参数设置为:放电时间为 3000 ms,放电强度为 +20 bit,推进量为 150  $\mu\text{m}$ 。最后,将传感 SMF 与输出 SMF 进行错

位熔接。利用电机的驱动功能,使输出 SMF 相对传感 SMF 沿  $x$  轴方向移动 7  $\mu\text{m}$ ,设置放电时间为 2000 ms,放电强度为标准强度,完成错位熔接点的制作。经过多次实验,得到的光纤锥区长度  $l$  在 368~388  $\mu\text{m}$  范围内,直径  $d$  在 163~178  $\mu\text{m}$  内,实验重复性好。同时还制作了相应尺寸的无凸锥结构传感器,并对仿真结果进行了实验验证。

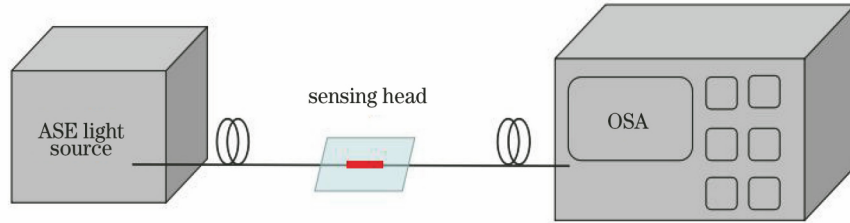


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic diagram of the measuring system

图 3 为无凸锥结构及有凸锥结构传感器的透射谱。由图可知,有凸锥结构的传感器透射谱条纹对比度较无凸锥结构的大。无凸锥结构条纹对比度最大为 16.4 dB,有凸锥结构的条纹对比度最大值为 24.4 dB。可见,引入凸锥结构后,传感器条纹的对比度得以增加。

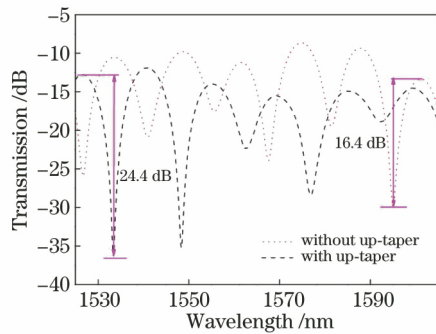


图 3 无凸锥结构的传感器透射谱及有凸锥结构的传感器透射谱

Fig. 3 Transmission spectra from the MZI without and with tapered structure

由图 3 可知,传感器的透射光谱并不均匀,说明其中不止一个包层模式被激发。将透射谱进行傅里叶变换,得到对应的空间频谱如图 4 所示。其空间频谱存在多个峰值,表明有多个包层模式被激发并参与干涉。但频谱中存在一个非常明显的主峰,说明只有一个主要的包层模式。由于其他包层模式能

量相对较弱,他们只会对干涉谱的形状产生轻微的影响,因此各干涉谷是由主要包层模式与纤芯基模干涉而成,呈现不同级次,但由于多个包层模式参与了干涉,故各干涉谷会受到其他模式的影响。

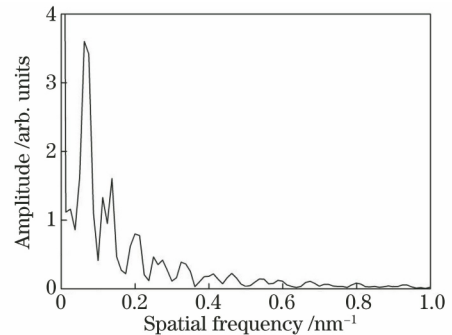


图 4 MZI 在空气中的空间频谱图

Fig. 4 Spatial frequency spectrum of the sensor in air

为确定参与干涉的主要包层模式的阶次,可通过主峰频率与纤芯基模-包层模式有效折射率差的关系进行确定。具体关系如下:

$$\xi = \frac{1}{\Delta\lambda_{\text{FSR}}} \approx \frac{\Delta n_{\text{eff}}^k L}{\lambda_0^2} \quad (7)$$

为得到 SMF 中各阶模式的有效折射率,利用 Comsol 有限元软件进行仿真,仿真参数为 SMF 的纤芯、包层直径分别为 8.2  $\mu\text{m}$ 、125  $\mu\text{m}$ ,纤芯、包层折射率分别为 1.4682、1.4628,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同模式的有效折射率

Table 3 Calculated  $n_{\text{eff}}$  of different order modes

Mode	LP <sub>01</sub>	LP <sub>02</sub>	LP <sub>03</sub>	LP <sub>04</sub>	LP <sub>05</sub>	LP <sub>06</sub>	LP <sub>07</sub>	LP <sub>08</sub>	LP <sub>09</sub>
$n_{\text{eff}}$	1.4652	1.4627	1.4626	1.4623	1.4618	1.4613	1.4607	1.4599	1.4590

由空间频谱图可知,主峰对应的空间频率为  $0.06242 \text{ nm}^{-1}$ ,取中心波长为  $1550 \text{ nm}$ ,干涉长度为  $41 \text{ mm}$ ,计算得到纤芯基模-主要包层模式的有效折射率差为  $0.0037$ 。与仿真结果进行对比,这一差值与  $\text{LP}_{06}$  模式和  $\text{LP}_{01}$  模式的有效折射率差值最接近。因此参与干涉的主要包层模式为  $\text{LP}_{06}$  模式。

### 3.2 折射率实验

进行折射率传感实验时,通过配制不同浓度的氯化钠溶液(质量分数为  $5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$ ,  $25\%$ )得到具有不同折射率的溶液。利用阿贝折射仪对溶液的折射率进行标定,测得不同浓度的溶液折射率分别为  $1.3449$ ,  $1.3540$ ,  $1.3615$ ,  $1.3705$ ,  $1.3797$ 。

实验过程中,使用滴管将溶液滴在 MZI 上,使传感器结构浸没在折射率溶液中,待透射谱稳定后记录数据,温度保持室温不变。为避免残留溶液的影响,每次实验结束后都用去离子水将传感器冲洗干净并自然晾干。

图 5(a)给出不同折射率溶液下测得的透射谱。随着外部折射率的增加,波谷 2 特征波长向短波长方向发生漂移,而波谷 1 特征波长对折射率变化不敏感,波长无明显变化。对实验数据进行拟合,得到波谷 2 的折射率灵敏度为  $K_{n2} = -25.682 \text{ nm/RIU}$ ,拟合系数为  $0.992$ 。由于光谱仪的分辨率为  $0.02 \text{ nm}$ ,波谷 2 的折射率分辨率为  $7.79 \times 10^{-4} \text{ RIU}$ 。

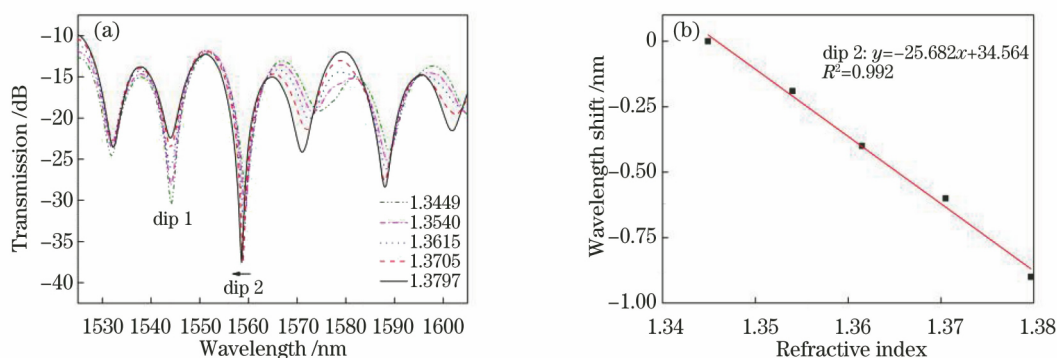


图 5 折射率传感特性。(a)不同折射率下的传感器透射谱;(b)波谷 2 的波长漂移量-折射率关系图

Fig. 5 Refractive index sensing characteristics. (a) Measured transmission spectra with different RI; (b) measured wavelength shift of the transmission dip 2 versus RI

### 3.3 温度实验

将传感器放置在质量分数为  $5\%$  的氯化钠溶液中进行温度实验,温度范围设定为  $25 \sim 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每隔  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  记录透射谱。随着外界环境温度的增加,谷 1 与谷 2 特征波长都向长波长方向发生了

漂移。对实验数据进行拟合,得到谷 1 与谷 2 的温度灵敏度分别为  $K_{T1} = 0.073 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$ ,  $K_{T2} = 0.064 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$ 。对应的拟合系数分别为  $0.995$ ,  $0.996$ 。得到谷 1 和谷 2 的温度分辨率为  $0.27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

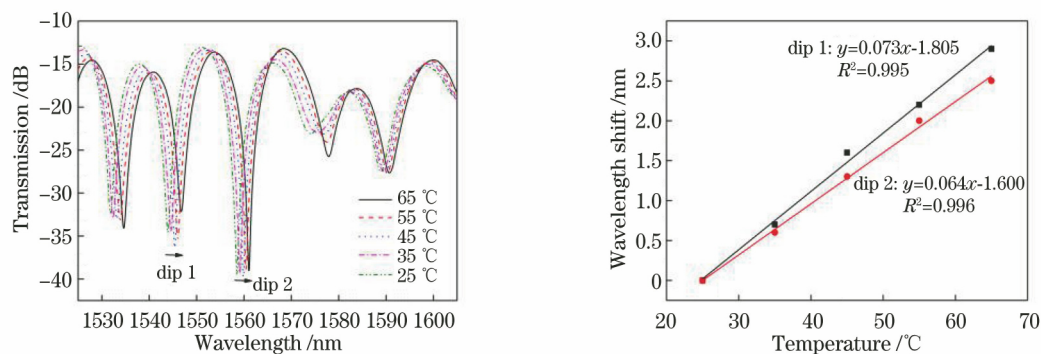


图 6 温度传感特性。(a)不同温度下的传感器透射谱;(b)谷 1 和谷 2 的波长漂移量-温度关系图

Fig. 6 Temperature sensing characteristics. (a) Measured transmission spectra with different temperature; (b) measured wavelength shift of the transmission dips versus temperature



根据以上实验结果,当外部折射率、温度同时变化时,谷 1 和谷 2 的波长漂移量可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{n1} \\ K_{T2} & K_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.073 & 0 \\ 0.064 & -25.682 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{n1} \\ K_{T2} & K_{n2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{T1}K_{n2} - K_{T2}K_{n1}} \begin{bmatrix} K_{n2} & -K_{n1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix},$$

因此传感矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.699 & 0 \\ 0.034 & -0.039 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}.$$

通过测量特征波长的漂移量,代入传感矩阵可得温度和折射率的变化量,实现了对温度和折射率的同时测量。实验中将折射率固定为 1.3468,温度从 30 °C 增加到 60 °C,每隔 10 °C 记录一次光谱,如

图 7(a) 所示。将记录的传感器透射谱的谷 1 和谷 2 对应的波长与 25 °C、折射率为 1.3449 环境下的光谱波长相减后得到波长漂移量,并代入传感矩阵,得到双参量同时测量的实验结果,如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可知,温度和折射率的最大误差分别为 1 °C 和 -0.0033 RIU,本传感器可以实现温度和折射率的同时测量。

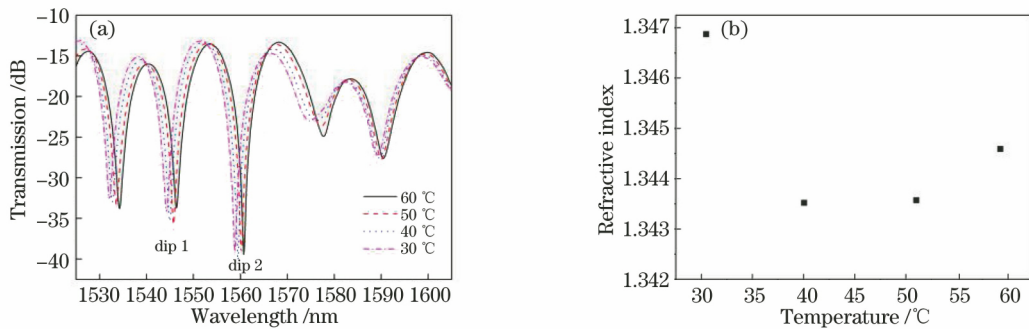


图 7 温度和折射率同时测量的实验结果。(a)透射谱;(b)实验结果

Fig. 7 Experimental results of simultaneous measurement of temperature and refractive index. (a) Transmission spectrum; (b) experimental result

## 4 结 论

提出了一种能同时测量折射率和温度的 MZI 传感器。沿光的传播方向,传感器结构由输入 SMF、带有凸锥结构的 MMF、剥去涂覆层的传感 SMF、错位熔接接头、输出 SMF 共 5 部分组成。由于多个包层模式参与干涉形成透射谱,且不同包层模式对外界的响应不一致,不同的干涉谷存在不同的响应特性。通过监测两个波谷的特征波长漂移量可以实现温度、折射率双参量传感。实验结果表明:两个波谷在 1.3449~1.3797 折射率范围的折射率灵敏度为 0 nm/RIU, -25.682 nm/RIU;在 25~65 °C 范围内的温度灵敏度分别为 0.073 nm/°C, 0.064 nm/°C。通过构建传感矩阵进行运算,可获得温度、折射率双参量数据。本传感器具有制作简单、成本低等优点,在化学、物理和生物传感领域具有很大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Silva S, Roriz P, Frazão O. Refractive index measurement of liquids based on microstructured optical fibers[J]. Photonics, 2014, 1(4): 516-529.
- [2] Yang B Y, Niu Y X, Yang B W, et al. High sensitivity balloon-like refractometric sensor based on singlemode-tapered multimode-singlemode fiber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 281: 42-47.
- [3] Shao L Y, Liang J W, Zhang X P, et al. High resolution refractive index sensing with dual-wavelength fiber laser[J]. IEEE Sensors Journal, 2016: 8463-8467.
- [4] Iadicco A, Campopiano S, Cutolo A, et al. Refractive index sensor based on microstructured fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(6): 1250-1252.
- [5] Ma X C, Zhou Z N, Liu A C, et al. A high-sensitivity and stable fiber Bragg grating temperature

- sensog[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(7): 1245-1250.
- 马晓川, 周振安, 刘爱春, 等. 高灵敏度稳定光纤光栅温度传感器的研究[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(7): 1245-1250.
- [6] Baldini F, Brenci M, Chiavaioli F, et al. Optical fibre gratings as tools for chemical and biochemical sensing [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2012, 402(1): 109-116.
- [7] Yang J, Yang L, Xu C Q, et al. Long-period grating refractive index sensor with a modified cladding structure for large operational range and high sensitivity[J]. Applied Optics, 2006, 45(24): 6142-6147.
- [8] Wang Q, Du C, Zhang J M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating[J]. Optics Communications, 2016, 377: 89-93.
- [9] Lim J L, Hu D J J, Shum P P, et al. Cascaded photonic crystal fiber interferometers for refractive index sensing[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(4): 1163-1169.
- [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] Qian W W, Zhao C L, Chan C C, et al. Temperature sensing based on ethanol-filled photonic crystal fiber modal interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(8): 2593-2597.
- [12] Tian Z B, Yam S S H, Barnes J, et al. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(8): 626-628.
- [13] Zhao Y, Chen M Q, Xia F, et al. Spectrum online-tunable Mach-Zehnder interferometer based on step-like tapers and its refractive index sensing characteristics [J]. Optics Communications, 2017, 403: 143-149.
- [14] Rong Q Z, Qiao X G, Wang R H, et al. High-sensitive fiber-optic refractometer based on a core-diameter-mismatch Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(7): 2501-2505.
- [15] Liu X X, Zhang X P, Liu Y, et al. Multi-point fiber-optic refractive index sensor by using coreless fibers [J]. Optics Communications, 2016, 365: 168-172.
- [16] Duan D W, Rao Y J, Xu L C, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer formed by large lateral offset fusion splicing for gases refractive index measurement with high sensitivity[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160(1): 1198-1202.
- [17] Zhang C, Xu S, Zhao J F, et al. Multipoint refractive index and temperature fiber optic sensor based on cascaded no core fiber-fiber Bragg grating structures [J]. Optical Engineering, 2017, 56(2): 027102.
- [18] Rong Q Z, Qiao X G, Guo T, et al. Temperature-calibrated fiber-optic refractometer based on a compact FBG-SMS structure [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(3): 030604.
- [19] Li J L, Zhang W G, Gao S C, et al. Long-period fiber grating cascaded to an S fiber taper for simultaneous measurement of temperature and refractive index[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(9): 888-891.
- [20] Chen Y F, Wang Y, Chen R Y, et al. A hybrid multimode interference structure-based refractive index and temperature fiber sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(2): 331-335.
- [21] Cheng J N. Mach-Zehnder interferometer based on fiber taper and fiber core mismatch for humidity sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(2): 024212.
- 程君妮. 基于光纤锥和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉湿度传感器[J]. 物理学报, 2018, 67(2): 024212.
- [22] Yu X J, Bu D, Chen X F, et al. Lateral stress sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer and Fourier analysis[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-10.
- [23] Wu D, Zhu T, Deng M, et al. Refractive index sensing based on Mach-Zehnder interferometer formed by three cascaded single-mode fiber tapers[J]. Applied Optics, 2011, 50(11): 1548-1553.