

基于无芯光纤的多参数测量传感器

孙家程 王婷婷 戴洋 常建华 柯炜

Multi-parameter measurement sensor based on no-core fiber

Sun Jia-Cheng Wang Ting-Ting Dai Yang Chang Jian-Hua Ke Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 064202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201474

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201474>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光纤锥和纤芯失配的Mach-Zehnder干涉湿度传感器

Mach-Zehnder interferometer based on fiber taper and fiber core mismatch for humidity sensing

物理学报. 2018, 67(2): 024212 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171677>

基于酒精与磁流体填充的单模-空芯-单模光纤结构温度磁场双参数传感器

A modal interferometer based on single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber structure filled with alcohol and magnetic fluid for simultaneously measuring magnetic field and temperature

物理学报. 2017, 66(7): 070601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070601>

基于量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪的低频信号测量

Measurement of low-frequency signal based on quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>

基于乙醇密封共振腔金属-介质-金属波导的高性能温度和折射率两用传感器

High performance temperature and refractive index dual-purpose sensor based on the ethanol-sealed metal-dielectric-metal waveguide

物理学报. 2020, 69(16): 167301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200405>

芯内双微孔复合腔结构的光纤法布里-珀罗传感器研究

Dual micro-holes-based in-fiber Fabry-Perot interferometer sensor

物理学报. 2018, 67(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180528>

基于向日葵型圆形光子晶体的高灵敏度太赫兹折射率传感器

High sensitivity terahertz refractive index sensor based on sunflower-shaped circular photonic crystal

物理学报. 2019, 68(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191024>

基于无芯光纤的多参数测量传感器*

孙家程¹⁾ 王婷婷¹⁾ 戴洋¹⁾ 常建华¹⁾ 柯炜^{2)3)†}

1) (南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

2) (南京师范大学, 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210023)

3) (江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

(2020 年 9 月 4 日收到; 2020 年 10 月 4 日收到修改稿)

设计并制作了一种基于单模-无芯-单模-无芯-单模光纤结构的马赫-曾德尔传感器, 可用来同时测量折射率和温度. 该传感器中, 两处无芯光纤充当输入、输出耦合器, 中间单模光纤作为传感臂. 利用有限元仿真和理论分析, 确定耦合器和传感臂的最优长度为 15 mm. 在无芯光纤中激发出的高阶模进入单模光纤的包层传输, 由于倏逝场的作用, 受到环境折射率和温度的影响. 选取透射谱不同干涉级次的波谷作为研究对象, 实现了折射率和温度的同步测量. 实验结果表明: 1545 nm 附近干涉谷的折射率和温度灵敏度分别为 -153.89 nm/RIU (refractive index unit) 和 $0.166 \text{ nm/}^\circ\text{C}$; 1570 nm 附近干涉谷的折射率和温度灵敏度分别为 -202.74 nm/RIU 和 $0.183 \text{ nm/}^\circ\text{C}$. 该传感器在实现折射率和温度同步测量的同时, 仍能保持较高灵敏度, 在生物医疗等方面有着较好的应用前景.

关键词: 马赫-曾德尔传感器, 纤芯失配, 折射率和温度, 同步测量**PACS:** 42.81.Pa, 07.07.Df, 42.25.Hz**DOI:** 10.7498/aps.70.20201474

1 引言

光纤传感器因具有灵敏度高、耐腐蚀、耐高温、抗电磁干扰等优点, 在测量湿度^[1,2]、折射率^[3,4]、pH^[5,6]、磁场^[7,8]、温度^[9,10]等方面有着广泛应用. 目前, 很多光纤传感器在单一参量的检测方面有着很好的性能, 但是很多情况下, 参量的改变并不是单独发生的, 例如折射率变化时, 温度也可能同时发生改变. 因此, 解决参量之间的串扰, 实现双参量乃至多参量的检测是未来光纤传感器的新趋势. Liu 等^[11]基于纤芯失配的原理, 制作出两段较细芯光纤夹住一段细芯光纤的结构, 以此测量折射率和温度. 该结构的折射率和温度灵敏度分别为 -169.0879 nm/RIU (refractive index unit) 和 $0.0464 \text{ nm/}^\circ\text{C}$. Wang 等^[12]提出一种多模光纤中

错位熔接一段无芯光纤的结构, 实验结果表明, 该结构在 1.333—1.3468 折射率范围和 20—100 $^\circ\text{C}$ 温度范围内, 灵敏度分别为 -1364.343 nm/RIU 和 $33 \text{ pm/}^\circ\text{C}$. Tong 等^[13]将两个球状光纤熔接在少模光纤的两端, 所组成的传感器在温度和折射率方面的灵敏度分别为 $0.054 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 和 -27.77 nm/RIU . 张傲岩等^[14]在两段多模光纤中熔接一段多芯光纤, 该结构的折射率和温度灵敏度为 54.3 nm/RIU 和 $109.0 \text{ pm/}^\circ\text{C}$.

上述文献都对传感器的温度和折射率进行了深入研究, 但是可以发现高折射率灵敏度和高温灵敏度不能同时满足, 而且部分结构所用光纤较为特殊, 熔接难度大, 制作成本高. 本文设计和制作了单模-无芯-单模-无芯-单模结构的马赫-曾德尔传感器, 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, 通过理论分析和仿真得出最

* 国家自然科学基金 (批准号: 61405094) 和江苏高校优势学科Ⅲ期建设工程项目 (“信息与通信工程”优势学科) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kewei@njnu.edu.cn

优无芯光纤和传感臂的长度. 实验结果选取两处波谷来对折射率和温度的灵敏度进行计算, 从而构成测量矩阵, 实现折射率和温度的同步测量.

2 传感器制作和理论分析

首先将一段单模光纤 (SMF) 与两段无芯光纤 (NCF) 轴向对称熔接, 再将熔接好的结构嵌入到单模光纤中, 构成图 1 所示的传感器结构. 实验中所使用的熔接机型号为 FSM-60S, 选用的光纤分别为康宁公司生产的单模光纤和长飞公司生产的无芯光纤. 其中, 单模光纤的包层直径为 $125\ \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $8.2\ \mu\text{m}$; 无芯光纤的直径为 $125\ \mu\text{m}$, 折射率为 1.444. 由于无芯光纤没有高折射率的纤芯, 且材料的掺杂与单模光纤不同, 因此在将单模光纤与无芯光纤熔接时, 为防止无芯光纤出现融塌现象, 实验中采用手动熔接, 各项熔接参数为: 清洁放电 150 ms, 光纤预熔时间 200 ms, 放电功率标准, 放电时间 300 ms. 手动熔接时, 需要在 x 和 y 方向上将两段光纤对齐, 使之轴向对称. 熔接完成后, 可再进行一次放电, 目的是降低损耗和加固熔接点.

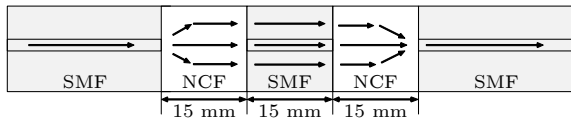


图 1 传感器结构和传光原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of sensor structure and light transmission principle.

当光从光纤光栅解调仪输出后, 经输入单模光纤传输到无芯光纤, 并激发出无芯光纤中的高阶模. 高阶模经单模光纤传输时, 由于包层和纤芯折射率不同, 包层模和基模在传输后会产生光程差. 存在光程差的不同模式再经无芯光纤耦合干涉, 由输出单模光纤输出干涉结果至光纤光栅解调仪得到透射谱. 其中两段无芯光纤起到耦合器的作用, 而中间段单模光纤则作为传感臂, 整体构成马赫-曾德尔结构. 当外界折射率发生变化时, 包层模有效折射率也随之变化, 从而影响光程差, 改变透射谱, 实现对外界折射率的反馈测量. 本结构中所用单模光纤和无芯光纤均为中心对称结构, 且输入光场具有角对称性, 因此在分析高阶模时只需要考虑本征模式 LP_{0m} 模^[15].

由于无芯光纤数值孔径较大, 在无芯光纤内存在多种模式的光, 因此需要考虑其自身的多模干涉. 随着光在无芯光纤内的传输, 各阶模式的光会相互干涉, 并在特定的长度位置出现周期性的光焦点, 这种现象称为自映像效应, 而特定长度处的光焦点称为自映像点^[16]. 在自映像点处, 各阶模式光耦合最好, 光强最大, 从而耦合到单模光纤的光能量也就越大. 通过有限元仿真, 得到如图 2 所示的光在 NCF 中传输的光场图. 可以清楚地看到光从单模光纤输入后, 在无芯光纤 $14823\ \mu\text{m}$ 左右处出现了与单模光纤和无芯光纤交界处相同的光场, 此处即为无芯光纤的自映像点, $14823\ \mu\text{m}$ 即为自映像长度. 在对光纤进行切割时, 限于实验条件, 精确度仅为 mm 级别, 因此选取无芯光纤的长度为 15 mm.

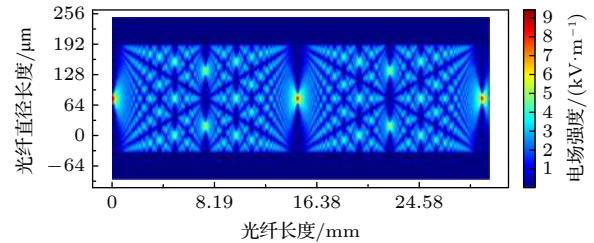


图 2 光沿 NCF 传播场分布图

Fig. 2. Field distribution of light propagation in NCF.

根据多光束干涉理论^[17], 传感器经输出单模光纤传输的能量可表示为

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

其中, I 表示输出的光强, I_{core} 和 I_{cladding}^m 分别表示中间单模光纤的基模和第 m 阶包层模, L 表示中间单模光纤传感臂的长度, $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 表示中间单模光纤的基模有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 表示中间单模光纤第 m 阶包层模的有效折射率, λ 表示光在空气中的波长.

随着外界待测液体折射率的增加, 单模光纤包层模的有效折射率也会随之增加, 而单模光纤纤芯和包层折射率不同, 从而使得光在纤芯和包层传输时产生相位差^[18], 即:

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

当纤芯模和包层模的相位差满足 $\Delta\varphi = (2j+1)\pi$,

$j = 0, 1, 2, \dots$ 条件时, 会在特定的波长处产生极小值, 该波长可表示为

$$\lambda_j = \frac{2(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding}, m})L}{(2j+1)}. \quad (3)$$

在干涉条纹中, 两处极小值所对应的波长间隔为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L}, \quad (4)$$

其中 Δn_{eff} 表示基模和包层模的有效折射率差值. 将 (3) 式对折射率进行求导可得^[19]

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial n} = \frac{2L}{2j+1} \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial n}. \quad (5)$$

由于 $\frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial n} < 0$, 所以 $\frac{\partial \lambda_j}{\partial n} < 0$, 因此传感器所测得的干涉谱中的干涉谷会随着外界待测液体折射率的增加而发生蓝移. 该传感器所形成的干涉谱如图 3 所示, 图中的干涉条纹清晰, 条纹对比度最大可达 14 dB, 因此可以满足在实验中的测量需要.

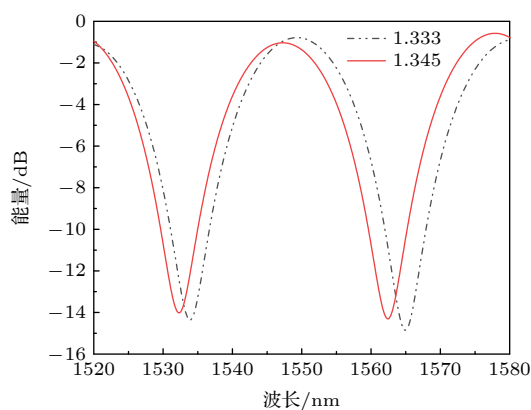


图 3 传感器在不同折射率溶液下的透射光谱图
Fig. 3. Transmission spectrum of the sensor under different refractive index solutions.

为了更好地分析包层模对干涉谱的影响, 将图 3 中的干涉谱进行傅里叶变换, 得到如图 4 所示的频谱图. 空间频率可表示为^[20]

$$\xi = \frac{1}{\lambda_0^2} \Delta m L, \quad (6)$$

式中, λ_0 为中心波长, L 为传感臂的长度, Δm 为模式群折射率差. 从图 4 可以看到, 在不同折射率的外界液体下, 两个频谱图均有一个非常明显的主峰, 且均在 0.00098 nm^{-1} 处, 这表明该处的模式为产生干涉条纹的主要模式. 对频谱图进一步对比可

以发现, 外界液体折射率越大, 干涉谱对应的频谱图曲线整体数值越低, 这是因为外界环境折射率增加会使得包层模内更多的能量被耦合到外界倏逝场, 从而整体包层模能量有所下降. 除去主峰对应的空间频率, 还存在一些低峰值对应的空间频率, 且频率均大于主峰对应的空间频率. 由于空间频率越高, 所对应的包层模阶数越高, 所以在该传感器中对干涉起到主要作用的包层模为低阶模, 因此可以认为图 3 所示的干涉条纹主要是由纤芯模和某个低阶包层模干涉产生的, 其他一些高阶包层模仅对干涉条纹起到轻微的调制作用.

通过 (4) 式可知, 透射谱还与传感臂的长度有关. 分别选取不同长度的传感臂, 作出其透射谱, 结果如图 5 所示.

从图 5 可以看到, 随着传感臂长度的增加, 干涉谷对应的波长间隔变小, 满足 (4) 式. 对比三条干涉谱条纹可以发现, 当传感臂长度为 10 和 15 mm

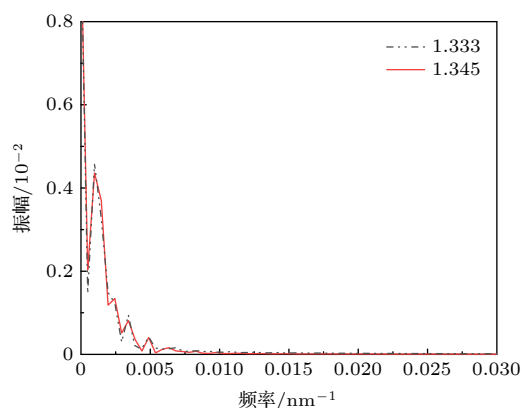


图 4 传感器的空间频谱图
Fig. 4. Spatial frequency spectrum of the sensor.

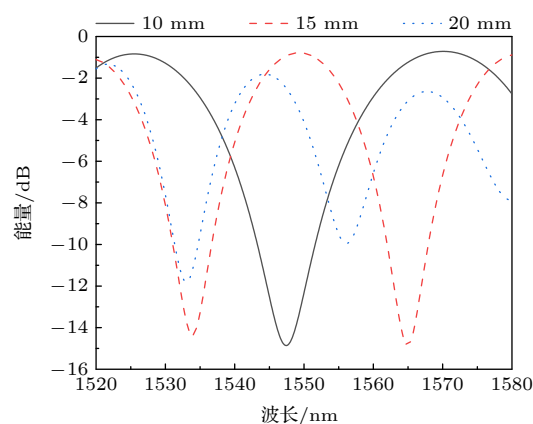


图 5 传感臂长度不同的传感器透射光谱图
Fig. 5. Transmission spectra of the sensor with different lengths of sensing arms.

时, 条纹对比度相近. 但是传感臂长度越短, 在目标波长范围内仅出现一处干涉谷, 且干涉谷逐渐展宽, 不利于数据读取. 在实际实验过程中, 光纤光栅解调仪的检测范围为 1510—1590 nm, 再结合干涉臂长度越短, 灵敏度越低的特点, 选取中间段单模光纤的最优长度为 15 mm.

由于单模光纤存在热光学效应和热膨胀效应, 单模光纤的长度、纤芯和包层的有效折射率均会随着温度的变化而改变. 根据文献 [21] 知, 单模光纤的热膨胀系数为 $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, 纤芯和包层的热光学系数分别为 $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 和 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 热光学系数远大于热膨胀系数, 因此纤芯基模和包层模随温度变化的情况可以用如下公式表示 [11]:

$$\begin{cases} \Delta n_{\text{core}} = \xi_{\text{core}} n_{\text{eff}}^{\text{core}} \Delta T, \\ \Delta n_{\text{cladding}} = \xi_{\text{cladding}} n_{\text{eff}}^{\text{cladding}} \Delta T. \end{cases} \quad (7)$$

依据 (7) 式可以计算出干涉谷随温度漂移量的公式:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{\text{dip}} &= \frac{2L}{2j+1} \left[\left(n_{\text{eff}, T_2}^{\text{core}} - n_{\text{eff}, T_2}^{\text{cladding}} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(n_{\text{eff}, T_1}^{\text{core}} - n_{\text{eff}, T_1}^{\text{cladding}} \right) \right] \\ &= \frac{2L}{2j+1} (\Delta n_{\text{core}} - \Delta n_{\text{cladding}}) \\ &= \frac{2L\Delta T}{2j+1} \left(\xi_{\text{core}} n_{\text{eff}}^{\text{core}} - \xi_{\text{cladding}} n_{\text{eff}}^{\text{cladding}} \right), \quad (8) \end{aligned}$$

其中, Δn_{core} 和 $\Delta n_{\text{cladding}}$ 分别为基模和包层模有效折射率变化量, ξ_{core} 和 ξ_{cladding} 分别为纤芯和包层的热光学系数, ΔT 表示温度变化量, T_1 和 T_2 分别表示初始和温度升高后的环境温度. 由于纤芯的热光学系数大于包层热光学系数, 且纤芯模有效折射率大于包层模有效折射率, 所以 $\Delta \lambda_{\text{dip}} > 0$, 因此干涉谷发生红移.

3 实验结果与分析

将实验装置如图 6 所示进行连接, 为了减少光纤的弯曲对实验结果的影响, 将无芯-单模-无芯部分固定在载玻片上, 再将载玻片固定在光学实验台上. 利用不同浓度的甘油作为实验中的折射率样本, 并用阿贝折射率测量仪测量出其折射率.

本次实验依据图 5 所示的干涉条纹, 考虑到条纹对比度以及干涉谱漂移后的条纹清晰度, 选取传感臂为 10 和 15 mm 来进行实验对比. 在实验过程

中, 每次测量一组数据结束后, 需用纸巾在传感器的一侧吸引甘油溶液, 并用无水乙醇反复稀释附着在传感器上的甘油, 直至传感器表面无附着物. 然后将传感器静置一小段时间, 来减小无水乙醇残留或微小形变对其产生的影响. 同一甘油浓度下均需测量三次数据, 并将数据求和取平均, 以此来减小误差.

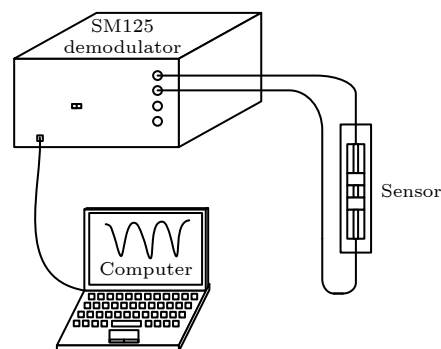


图 6 实验装置

Fig. 6. Schematic diagram of experimental setup.

实验中, 10 和 15 mm 传感臂长度的传感器分别取 1550 和 1570 nm 左右的波谷作为干涉谱漂移的监测对象, 利用光纤光栅解调仪来记录在室温 (22 $^{\circ}\text{C}$) 下不同甘油浓度下的干涉条纹, 结果如图 7 和图 8 所示.

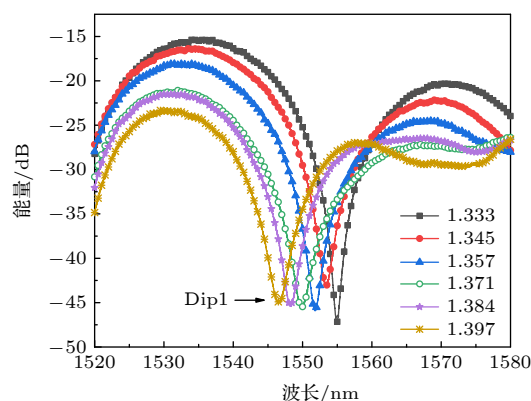


图 7 10 mm 传感臂的传感器在不同环境折射率溶液中的透射光谱图

Fig. 7. Transmission spectra of the sensor with 10 mm sensing arm response under different ambient refractive index solutions.

选取清水的折射率背景进行分析. 从图 7 可知, 10 mm 长传感臂所对应的干涉谱波长间隔为 32.245 nm, 从图 8 可知, 15 mm 长传感臂所对应的干涉谱波长间隔为 24.075 nm, 由 (4) 式可知, 干涉臂长度越长, 波长间隔越大. 同时在图 7 和图 8

中可以看到,随着甘油浓度的增加,干涉条纹的对比度有所降低.这是因为,外界液体折射率升高会导致包层有效折射率增加,但增加的速度不如外界液体折射率,因此包层的有效折射率和液体折射率差值越来越小,包层中会有更多的能量被耦合至外界倏逝场中,减小条纹对比度.

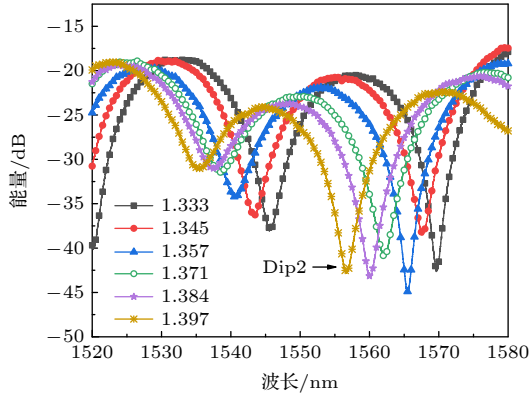


图 8 15 mm 传感臂的传感器在不同环境折射率溶液中的透射光谱图

Fig. 8. Transmission spectra of the sensor with 15 mm sensing arm response under different ambient refractive index solutions.

不同长度传感臂的灵敏度拟合结果如图 9 所示.可以发现,10 和 15 mm 长度的传感臂灵敏度分别为 -132.44 和 -202.74 nm/RIU. 由 (3) 式可知,选取同样级次的包层模,纤芯基模和包层模有效折射率差值的变化量即 δn_{eff} 会保持不变.在不同折射率液体下,传感臂长度越长,干涉条纹极小值所对应的波长之差就越大,即漂移量越大,灵敏度越高.但传感臂长度并不能无限长,还需要考虑到整体传感器的机械性能.该传感器的整体长度为

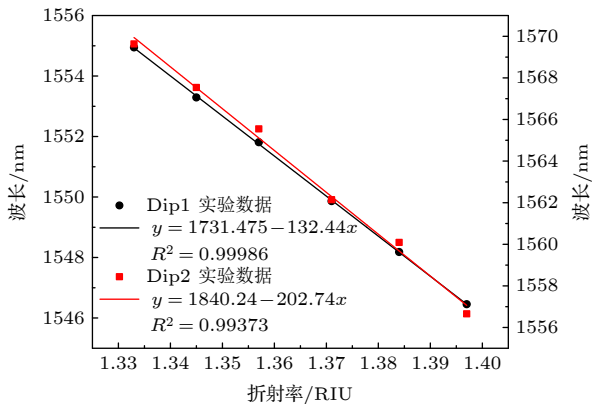


图 9 不同长度传感臂的折射率灵敏度拟合图

Fig. 9. Fitting diagram of refractive index sensitivity with different length sensing arms.

45 mm, 较为紧凑, 有较好的机械强度.

从上述可知,该传感器的传感臂最优长度为 15 mm. 对图 8 进一步分析可知,1545 nm 处的波谷所对应的灵敏度为 -153.89 nm/RIU, 低于 1570 nm 处的灵敏度. 由 (3) 式可知,1545 nm 处的干涉谷是高级次峰值波长,1570 nm 处的干涉谷是低阶次峰值波长.在不同浓度甘油下,纤芯基模有效折射率和不同阶次包层模有效折射率差值的变化量即 δn_{eff} 变化量相差较小,仅为 10^{-7} 量级,而 (3) 式分母变化量为 $10^0 - 10^1$ 量级,因此,低阶次峰值波长随外界折射率变化,漂移量更大,灵敏度更高.

为了测量该传感器的温度性能,在载玻片周围用热熔胶枪做出凹槽并加入清水,然后放置在温箱中进行加热,检测干涉谱随温度变化的情况.从 30 °C 加热到 70 °C,选择 1545 和 1570 nm 左右的波谷,每隔 5 °C 记录一次数据,结果如图 10 所示.可以看出,在 30—70 °C 温度范围内,干涉谷随着温度的升高发生红移,谷 1 和谷 2 漂移量分别为 7.49 和 8.38 nm,将不同温度对应的干涉谷波长进行拟合,得到图 11 所示的灵敏度,分别为 0.1817 和 0.2035 nm/°C.

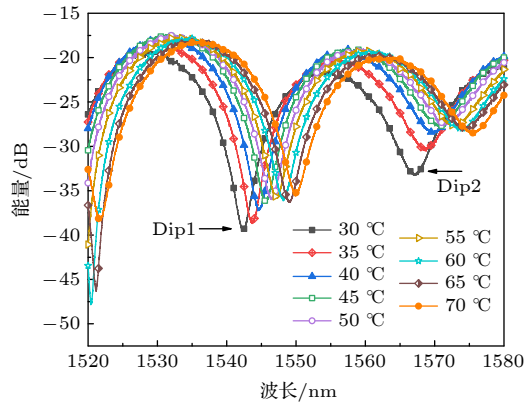


图 10 传感器在不同温度下的透射光谱图

Fig. 10. Transmission spectra of the sensor response at different values of temperature.

由于水的折射率随着温度的升高而减小,因此图 10 所示的干涉谱受环境温度和環境折射率共同影响而产生.因此,传感器的温度灵敏度可以表示为^[22]

$$K_T = \hat{K}_T + K_n R_{n,T}, \quad (9)$$

式中 \hat{K}_T 为传感器单独受温度影响所测得的灵敏度, K_n 为折射率灵敏度. $R_{n,T}$ 是液体的温度系数,

文中所用清水的温度系数为^[23] $R_{n,T} = 1.02 \times 10^{-4}$. 根据 (9) 式, 可以计算得出 dip1 和 dip2 的温度灵敏度为 0.166 和 0.183 nm/°C.

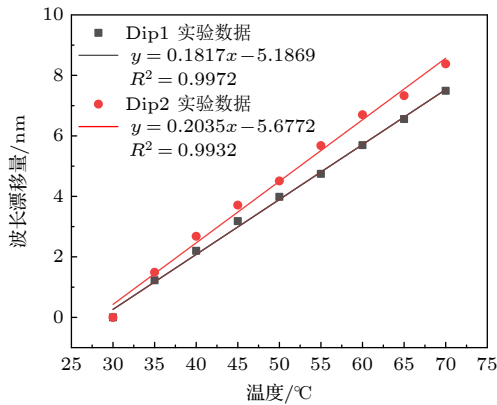


图 11 不同级次干涉谷的温度灵敏度拟合图

Fig. 11. Fitting diagram of temperature sensitivity with different order interference dips.

文中传感器对折射率和温度的响应不同, 可以实现对折射率和温度的同时测量. 当环境折射率和温度同时发生改变时, 波长漂移量可表示为

$$\Delta\lambda = K_n \Delta n + K_T \Delta T. \quad (10)$$

依据 (10) 式, 两处干涉谷波长漂移量与环境折射率、温度的变化关系表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{m1} \\ \Delta\lambda_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\lambda_{m1}}{\partial n} & \frac{\partial\lambda_{m1}}{\partial T} \\ \frac{\partial\lambda_{m2}}{\partial n} & \frac{\partial\lambda_{m2}}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (11)$$

代入两处干涉谷所测得的折射率和温度灵敏度, 得到如下矩阵公式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{m1} \\ \Delta\lambda_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -153.89 & 0.166 \\ -202.74 & 0.183 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (12)$$

将 (12) 式中灵敏度系数矩阵进行转置, 通过测量不同级次干涉谷的漂移量即可实现折射率和温度的同时测量, 并且消除了交叉敏感. 测量矩阵如下所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{5.49297} \begin{bmatrix} 0.183 & -0.166 \\ 202.74 & -153.89 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{m1} \\ \Delta\lambda_{m2} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

通过上述实验和计算得到折射率和温度灵敏度, 将其与文献中能同时测量折射率和温度的传感器性能进行比较, 得到表 1 所列的结果.

从表 1 可以看出, 相比其他结构的传感器, 本文设计的传感器结构简单, 在满足同步测量折射率

和温度的同时, 能够保持较高的灵敏度. 文中采用无芯光纤作为耦合器, 相比多模光纤而言, 无芯光纤能够激发出更多高阶模式的光进入传感臂包层, 产生的倏逝波更易接触到外界待测物质, 提高灵敏度. 同时使得中间传感臂所需长度减小, 提高传感器整体的机械强度. 表中结构单模-多模-无芯-多模-单模虽然在折射率方面, 灵敏度较高, 但是其所检测的范围仅为 1.333—1.3468, 无法满足宽折射率范围的测量.

表 1 同步测量折射率和温度的马赫-曾德尔传感器的性能比较

Table 1. Performance comparison of Mach-Zehnder sensors with simultaneous measurement of refractive index and temperature.

结构	折射率灵敏度 (nm·RIU ⁻¹)	温度灵敏度 (nm·°C ⁻¹)
单模-多模- 细芯-单模 ^[10]	-18.17640	0.0733
单模-细芯-细芯- 细芯-单模 ^[11]	-169.0879	0.0464
单模-多模-无芯- 多模-单模 ^[12]	-1364.343	0.0330
单模-球状-少模- 球状-单模 ^[13]	-27.77000	0.0540
单模-多模-多芯- 多模-单模 ^[14]	54.30000	0.109
本工作	-202.7400	0.183

4 结 论

本文提出并制作了一种基于纤芯失配的马赫-曾德尔传感器, 并对该传感器结构参数进行了详细的理论分析, 明确参与干涉的主要模式频率, 得到各级次干涉谷折射率和温度的响应灵敏度. 实验现象与理论分析一致, 解决了折射率和温度的交叉敏感问题, 实现了折射率和温度的同步测量. 折射率和温度在 1.333—1.397 和 30—70 °C 范围内对应的最优灵敏度分别为 -202.74 nm/RIU 和 0.183 nm/°C. 该传感器相比于一般的纤芯失配型传感器, 灵敏度高、长度短、结构紧凑, 有较好的机械强度, 因此在生物和化学等领域有较好的应用前景.

参考文献

- [1] Tong R J, Zhao Y, Chen M Q, Peng Y 2019 *Opt. Fiber Technol.* **48** 242
- [2] Wang Y L, Liu Y Q, Zou F, Jiang C, Mou C B, Wang T Y

- 2019 *Sensors* **19** 2263
- [3] Hooda B, Rastogi V 2018 *Optik* **170** 237
- [4] Zhang C B, Ning T G, Li J, Pei L, Li C, Lin H 2017 *Opt. Fiber Technol.* **33** 71
- [5] Semwal V, Gupta B D 2019 *Sens. Actuators, B* **283** 632
- [6] Zubiate P, Zamarreno C R, Villar I D, Matias I R, Arregui F J 2016 *Sens. Actuators, B* **231** 484
- [7] Luo Y, Lei X Q, Shi F Q, Peng B J 2018 *Optik* **174** 252
- [8] Pu S L, Tang J L, Liu Z H, Luo L F 2015 *Acta Photon. Sin.* **44** 1206002 (in Chinese) [卜胜利, 汤佳莉, 刘志恒, 罗龙锋 2015 光子学报 **44** 1206002]
- [9] Wang F, Pang K B, Ma T, Wang X, Liu Y F 2020 *Opt. Laser Technol.* **130** 106333
- [10] Jiao T, Meng H Y, Deng S Y, Liu S, Wang X J, Wei Z C, Wang F Q, Tan C H, Huang X G 2019 *Opt. Laser Technol.* **111** 612
- [11] Liu W, Wu X Q, Zhang G, Li S L, Zuo C, Fang S S, Yu B L 2020 *Opt. Fiber Technol.* **54** 102101
- [12] Wang L Q, Yang L, Zhang C, Miao C Y, Zhao J F, Xu W 2019 *Opt. Laser Technol.* **109** 193
- [13] Tong Z R, Zhong Y M, Wang X, Zhang W H 2018 *Opt. Commun.* **421** 1
- [14] Zhang A Y, Huang H L, Jiang C, Dong H Y, Wang X, Liu C Y, Sun S M, Hu H L 2017 *J. Optoelectron. Lasers* **30** 1017 (in Chinese) [张傲岩, 黄会玲, 江超, 董航宇, 王解, 刘昌宁, 孙四梅, 胡荟灵 2017 光电子·激光 **30** 1017]
- [15] Wu Q, Semenova Y, Wang P F, Farrell G 2011 *Opt. Express* **19** 7937
- [16] Liu M, Feng D J, Feng W L 2019 *Acta Opt. Sin.* **39** 1006007 (in Chinese) [刘敏, 冯德玖, 冯文林 2019 光学学报 **39** 1006007]
- [17] Cheng J N 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024212 (in Chinese) [程君妮 2018 物理学报 **67** 024212]
- [18] Li H D, Fu H W, Shao M, Zhao N, Qiao X G, Liu Y G, Li Y, Yan X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214209 (in Chinese) [李辉栋, 傅海威, 邵敏, 赵娜, 乔学光, 刘颖刚, 李岩, 闫旭 2013 物理学报 **62** 214209]
- [19] Wang Q, Zou H, Wei W 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 1006005 (in Chinese) [王旗, 邹辉, 韦玮 2017 光学学报 **37** 1006005]
- [20] Choi H Y, Kim M J, Lee B H 2007 *Opt. Express* **15** 5711
- [21] Peng X L, Cha Y P, Zhang H, Li Y L 2018 *Acta Photon. Sin.* **47** 1106006 (in Chinese) [彭星玲, 茶映鹏, 张华, 李玉龙 2018 光子学报 **47** 1106006]
- [22] Wang H H, Meng H Y, Xiong R, Wang Q H, Hung B, Zhang X, Yu W, Tan C H, Huang X G 2016 *Opt. Commun.* **364** 191
- [23] Yan J H, Zhang A P, Shao L Y, Ding J F, He S L 2007 *IEEE Sens. J.* **7** 1360

Multi-parameter measurement sensor based on no-core fiber*

Sun Jia-Cheng¹⁾ Wang Ting-Ting¹⁾ Dai Yang¹⁾

Chang Jian-Hua¹⁾ Ke Wei^{2)3)†}

¹⁾ (School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University
of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

²⁾ (Key Laboratory of Optoelectronics Technology of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

³⁾ (Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and
Application of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China)

(Received 4 September 2020; revised manuscript received 4 October 2020)

Abstract

Aiming at the phenomenon of single measurement parameters and low sensitivity of most Mach-Zehnder sensors based on fiber core mismatch, in this paper we design and build a Mach-Zehnder sensor based on single-mode-no-core-single-mode-no-core-single-mode fiber structure, which can be used to measure refractive index and temperature simultaneously. In this sensor, two no-core optical fiber serve as input and output couplers, the intermediate single-mode is used as a sensing arm. Using finite element simulation and theoretical analysis, the optimal length of the coupler and the sensing arm are determined to be 15 mm. High-order modes excited by no-core optical fiber propagate through the cladding of single-mode fiber, which is affected by the ambient refractive index and temperature because of the influence of the evanescent field. Trough of different interference orders of transmission spectrum is selected as a research object to realize the simultaneous measurement of refractive index and temperature by using sensitivity coefficient matrix. After the further Fourier transform of the transmission spectrum, the frequency of the main mode that interferes with the fundamental mode is analyzed from the spectrogram to be 0.00098 nm^{-1} . Because of the influence of temperature on the refractive index of water during temperature sensitivity measurement, temperature sensitivity formula and water temperature coefficient are introduced to perform temperature compensation to eliminate the cross sensitivity. In this paper, the 10 mm and 15 mm sensing arms are selected for refractive index comparison experiment, and the temperature experiment is focused on the sensing arm with an optimal length of 15 mm. The experimental results show that the transmission spectrum is blue-shifted with the increase of refractive index in a refractive index range of 1.333–1.397, and the transmission spectrum is red-shifted with the increase of temperature in a temperature range from 30 °C to 70 °C. The refractive index and temperature sensitivity of the interference valley near 1545 nm are -153.89 nm/RIU and $0.166 \text{ nm/}^\circ\text{C}$, respectively; the refractive index and temperature sensitivity of the interference valley near 1570 nm are -202.74 nm/RIU and $0.183 \text{ nm/}^\circ\text{C}$, respectively. The experimental results are consistent with the theoretical analyses. Compared with the sensor of the same type, this sensor can still maintain high sensitivity while achieving simultaneous measurement of refractive index and temperature, and has a simple structure, which has a good application prospect in biomedical and other aspects.

Keywords: Mach-Zehnder sensor, core diameter mismatch, refractive index and temperature, simultaneous measurement

PACS: 42.81.Pa, 07.07.Df, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.70.20201474

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61405094) and the Priority Academic Program Phase III Development of Higher Education Institution of Jiangsu Province (“Information and Communication Engineering” Priority Academic Program), China.

† Corresponding author. E-mail: kewei@njnu.edu.cn