

芯内双微孔复合腔结构的光纤法布里-珀罗传感器研究

张伟 刘颖刚 张庭 刘鑫 傅海威 贾振安

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

Zhang Wei Liu Ying-Gang Zhang Ting Liu Xin Fu Hai-Wei Jia Zhen-An

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 204203 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180528

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180528>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

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 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171677>

基于综合特征的光纤周界安防系统高效入侵事件识别

High-efficiency intrusion recognition by using synthesized features in optical fiber perimeter security system

物理学报.2017, 66(12): 124206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.124206>

基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器

Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect

物理学报.2017, 66(9): 094205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094205>

面向地壳形变观测的超高分辨率光纤应变传感系统

Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation

物理学报.2017, 66(7): 074208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074208>

基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体共振传感解调算法

Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters

物理学报.2017, 66(7): 074202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074202>

芯内双微孔复合腔结构的光纤法布里-珀罗传感器研究*

张伟¹⁾ 刘颖刚^{2)†} 张庭²⁾ 刘鑫²⁾ 傅海威²⁾ 贾振安²⁾

1) (西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

2) (西安石油大学, 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

(2018年3月25日收到; 2018年6月24日收到修改稿)

提出了一种基于芯内双微孔复合结构的全光纤干涉传感器结构, 建立了传感器反射光谱的理论模型, 给出了反射光谱强度与微孔长度、孔内介质折射率、微孔端面反射与损耗系数以及光纤的特性参数间的关系, 并模拟了传感器光谱对温度和折射率变化的响应特性. 利用 193 nm 准分子激光器, 在普通单模光纤上加工制作了具有复合腔结构的全光纤多参量传感器, 进行了传感实验研究. 结果表明, 该传感器具有优于 99% 的温度、折射率线性响应度, 对应两套温度和折射率灵敏度分别为 $-0.172 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $1050.700 \text{ nm}/\text{RIU}$ 和 $0.004 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $48.775 \text{ nm}/\text{RIU}$, 不仅能够实现温度、折射率以及它们的区分测量, 还能够应用于气体压力的测量, 测量精度可达 0.3 kPa.

关键词: 光纤传感器, 法布里-珀罗干涉仪, 温度, 折射率

PACS: 42.81.Pa, 42.81.Bm, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.67.20180528

1 引言

近年来, 光纤传感技术由于自身的诸多优点, 不仅成为了研究的热点, 而且取得了长足的发展, 在桥梁建筑、生物化学、石油石化、航天航空乃至国防科技等诸多领域得到了应用^[1-3]. 特别是基于光纤的新型传感器研究与应用成为了研究热点, 先后提出了多种结构的光纤干涉型传感器^[4-7], 比如光纤法布里-珀罗 (FP) 干涉仪、光纤马赫-曾德尔干涉仪、光纤迈克耳孙干涉仪、光纤萨格纳克干涉仪等, 并将这些传感器件应用于不同领域不同物理量的测量, 展现了干涉型光纤传感器的诸多优点.

光纤法布里-珀罗干涉型 (FPI) 传感器由于具备了传感器体积微型化发展要求, 具有可调自由谱范围和高对比度的传输光谱, 又兼备微型化传感特点, 相关研究与应用不断取得新进展, 已经成为光纤传感器家族中的重要成员^[8]. 研究者们提出了化学腐蚀法、电弧放电法、飞秒激光加工法以及聚合

物辅助制备等光纤 FP 传感器制作方法^[9-12], 由于制作腔体和选用材料的不同, 使得 FP 传感器在温度、压力、折射率及其区分传感测量方面表现出了不同的优良特性. 其中, 化学腐蚀法主要用来控制基于膜片型腔体的厚度, 由于受到腐蚀条件 (浓度、温度及工艺) 的限制, 虽然能获得厚度为几微米的膜片并实现较高灵敏度的压力温度传感, 但测量范围较小, 制作工艺复杂, 因而难以规模生产; 电弧放电法主要用于将不同类型光纤进行熔接从而构成 FP 腔体, 特别是利用新型光子晶体光纤做腔体, 能够实现对气体的测量^[13], 虽制作工艺简单, 但存在腔体长度难以精确控制的问题; 飞秒激光加工可对微型腔体进行高效加工, 实现了在光纤内部进行三维腔体的加工, 更加拓展了光纤传感器的功能和应用领域, 但存在激光器成本及维护费用昂贵的问题; 聚合物辅助制备法主要是利用聚合物材料的低杨氏模量、易加工成超薄膜片的特性制作腔体薄膜, 同样存在膜片厚度难以控制、传感器制作重复

* 国家自然科学基金 (批准号: 61240028) 和陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2013JM8032) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ygliu@xsyu.edu.cn

性差的问题, 不能实现全光纤传感器结构, 降低了传感器耐强酸碱的性能. 因此, 融合多种制作方法的优点, 降低制作难度和成本应该是进一步研究的方向.

本文利用 193 nm 波长的 ArF 准分子激光器, 成功制备了一种基于双开放型微孔的全光纤 FP 传感器, 通过对多腔干涉光谱的分析, 实现了对周围环境折射率和温度的有效测量. 在传感器制作方法上, 相比于飞秒激光加工、特种光纤熔融拼接以及涂敷薄膜材料的方法, 利用准分子激光器、普通单模光纤以及国产位置控制系统制作 FP 结构传感器, 可以简化制作工艺、有效降低制作成本. 由于微孔的尺寸和孔间距可以有效控制, 相对于文献 [14] 所提出的利用缺陷光纤融合电弧放电的方法, 本文所提方法更适合传感器的批量重复生产. 在传感器的结构上, 由于是全光纤复合 FP 腔结构, 尺寸微小, 不仅能够应用于一般环境温度、折射率和压力等物理量的传感测量, 还可以应用于高温、高压、强腐蚀等极端环境相关物理量的测量. 通过采用新型功能材料的封装保护处理, 也能制作不同功能的传感和通信器件, 必将有助于推动光纤 FP 腔型器件的更多功能化应用.

2 基本原理与分析

无论是本征还是非本征型光纤 FP 腔, 在结构上必须利用不同折射率材料界面构成腔体(空气腔、光纤腔、薄膜材料腔等)反射面以形成多光束干涉, 但由于这种界面的反射率相对较低, 多次反射后的光占总光强的比例不足 0.1% [15,16], 因此可看成双光束干涉. 图 1 是提出的双微孔 FP 型光纤传感器的结构原理图.

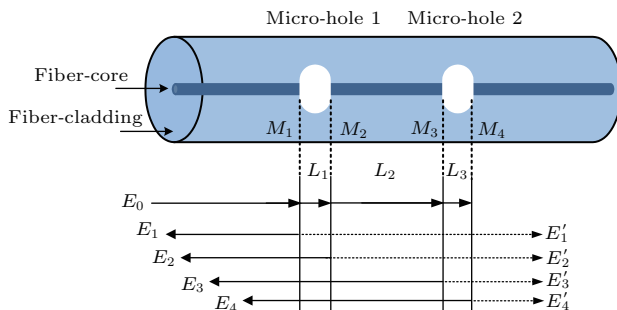


图 1 双孔光纤法布里-珀罗干涉 (FFPI) 传感器结构与工作原理图

Fig. 1. Schematic diagram of structure and working principle for the dual micro-holes-based fiber Fabry-Perot interferometer (FFPI) sensor.

两个微孔在光纤中形成了四个反射面, 分别用 M_1 , M_2 , M_3 和 M_4 表示, 任意两个面之间可以形成一个 FP 腔. 因此, 当 M_1, M_2 的间距 L_1 与 M_3, M_4 的间距 L_3 不相等时, 在光纤中便形成六个腔长 ($L_1, L_2, L_3, L_1 + L_2, L_2 + L_3, L_1 + L_2 + L_3$) 不同的 FP 腔. 当振幅为 E 的光入射光纤穿过四个面时, 便会在相应面发生反射和透射, 而透过的光束又会被下一个面反射和透射. 假设被反射面 M_1, M_2, M_3 和 M_4 反射的光传输到 M_1 面处的振幅分别为 E_1, E_2, E_3 和 E_4 (对应的透射光传输到 M_4 面处的振幅为 E'_1, E'_2, E'_3 和 E'_4), 不考虑传感器尾端光纤端面的反射, 根据文献 [16, 17] 给出的三光束叠加结果, 同时考虑实际光在反射面 M_2 和 M_4 产生 π 相位跃变, 反射后的总光强可以用四光束复振叠加原理表示为:

$$\begin{aligned}
 I = & |E_1 - E_2 \exp(-i\Delta\varphi_{21}) \\
 & + E_3 \exp[-i(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{32})] \\
 & - E_4 \exp[-i(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{32} + \Delta\varphi_{43})]|^2 \\
 = & E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 - 2E_1E_2 \cos(\Delta\varphi_{21}) \\
 & - 2E_2E_3 \cos(\Delta\varphi_{32}) - 2E_3E_4 \cos(\Delta\varphi_{43}) \\
 & + 2E_1E_3 \cos(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{32}) \\
 & + 2E_2E_4 \cos(\Delta\varphi_{32} + \Delta\varphi_{43}) \\
 & - 2E_1E_4 \cos(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{32} + \Delta\varphi_{43}), \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 $\Delta\varphi_{21}$, $\Delta\varphi_{32}$ 和 $\Delta\varphi_{43}$ 分别代表 M_1 与 M_2 , M_2 与 M_3 和 M_3 与 M_4 面之间反射光束的相位差, 与不同腔长 L 以及腔内介质折射率 n 有如下关系:

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi_{21} = & \frac{4\pi}{\lambda} n_1 L_1, \quad \Delta\varphi_{32} = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 L_2, \\
 \Delta\varphi_{43} = & \frac{4\pi}{\lambda} n_3 L_3, \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中 λ 是入射光波长; n_1, n_2 和 n_3 分别是腔长 L_1, L_2 和 L_3 对应的腔体介质折射率. 由于应用中两个开放式 FP 微腔处在相同的环境中, 则 $n_1 = n_3$. 若假设每个反射面对应的反射系数和传输损耗系数分别为 $R_1/\alpha_1, R_2/\alpha_2, R_3/\alpha_3$ 和 R_4/α_4 , 则有:

$$\begin{aligned}
 E_1 = & \sqrt{R_1} E_0, \\
 E_2 = & (1 - \alpha_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2} E_0, \\
 E_3 = & (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - R_1)(1 - R_2)\sqrt{R_3} E_0, \\
 E_4 = & (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)(1 - R_1)(1 - R_2) \\
 & \times (1 - R_3)\sqrt{R_4} E_0. \quad (3)
 \end{aligned}$$

因此可以看到, 当每个面都参与反射时, 必将形成不同的复合腔, 由 (1) 式和 (2) 式可得出每一个

腔对应的光程差(optical path difference, OPD)分别为 $2n_1L_1$, $2n_2L_2$, $2n_1L_3$, $2(n_1L_1 + n_2L_2)$, $2(n_2L_2 + n_1L_3)$ 和 $2(n_1L_1 + n_2L_2 + n_1L_3)$, 其中OPD分别为 $2n_1L_1$, $2n_2L_2$ 和 $2n_1L_3$ 的腔体是三个基本的FP腔, 另外三个为它们组成的复合腔, 并且OPD越大相差越大, 对应干涉条纹越密集, 即光强随波长变化的频率越高. 如果微孔的尺寸相同($L_1 = L_3$), 则工作腔长的个数减少, 对应的OPD将减少到4个, 即 $2n_1L_1$, $2n_2L_2$, $2(n_1L_1 + n_2L_2)$ 和 $2(n_2L_2 + 2n_1L_1)$. 光强表达式(1)可简化为

$$\begin{aligned}
 I = & E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 \\
 & - 2(E_1E_2 + E_3E_4) \cos(\Delta\varphi_{21}) \\
 & - 2E_2E_3 \cos(\Delta\varphi_{32}) \\
 & + 2(E_1E_3 + E_2E_4) \cos(\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{32}) \\
 & - 2E_1E_4 \cos(2\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{32}). \quad (4)
 \end{aligned}$$

因此, 最终的输出光谱将是具有不同空间频率的余弦函数的线性叠加谱. 这样的输出光谱强度除了与光纤材料折射率、腔体长度有关外, 还与传感器所处环境折射率、温度以及外界作用等多因素有关. 一旦环境因素改变导致折射率、腔体长度以及腔面反射和损耗系数发生变化, 必将导致输出光谱干涉条纹对应波长和强度发生变化^[16,17].

由于不同腔两反射面间产生的光程差OPD满足以下关系式:

$$\begin{aligned}
 OPD = & 2nL \\
 = & \begin{cases} k\lambda_p \\ (2k+1)\lambda_d \end{cases} \quad (k \text{ 为条纹级数, 取整数}). \quad (5)
 \end{aligned}$$

因此, 当外界温度变化时, 会导致腔内介质折射率或腔长发生改变, 进而导致光程差变化, 不同FP腔干涉谱条纹的峰值波长 λ_p 或谷值波长 λ_d 会发生相应改变, 根据文献[18]中的光纤热响应模型, 则峰值波长、谷值波长变化满足关系

$$\begin{aligned}
 \Delta\lambda_{p,d} = & \lambda_{p,d} \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \right) \\
 = & \lambda_{p,d} (\alpha + \xi + \zeta) \cdot \Delta T, \quad (6)
 \end{aligned}$$

其中 α , ξ 和 ζ 分别为光纤热膨胀系数、热光系数和液体热光系数. 对于光纤介质腔($\zeta = 0$), 由于光纤的热膨胀效应强于自身热光效应, 因此其光学特性由光纤决定. 而对于光纤中的液体腔($\xi \neq 0$), 由于液体热光效应对波长的影响强于光纤热膨胀效应, 会导致其光学特性由液体性质决定, 所以在温度升

高时, 液体折射率的减小将导致干涉条纹向短波方向移动.

当腔内介质折射率变化而温度保持不变时, 由于光程差的变化仅来自于介质折射率的变化, 因此液体介质腔对应的干涉条纹发生移动, 其光谱峰值或谷值波长的移动满足以下关系:

$$\Delta\lambda_{p,d} = \frac{\lambda_{p,d}}{n} \Delta n, \quad (7)$$

而光纤介质腔的干涉条纹保持不变, 即对折射率变化不敏感.

可见, 此种传感器不仅可以用于折射率、温度的测量, 还可实现基于折射率变化的气体压强、压力的测量. 由于不同光学腔长的FP干涉谱随折射率、腔长变化的系数不同, 因此传感器的反射光谱不仅是几个FP腔产生干涉谱的迭加, 而且在外界环境变化时移动的速度甚至方向也是不一样的. 选择合适干涉条纹的峰值或谷值波长进行测量, 不但可获得折射率或腔长的变化, 甚至还可以获得引起它们变化的环境因素的变化, 这种特性就是进行多物理量传感甚至区分测量的原理.

3 光谱分析与理论模拟

图2(a)所示是设计制作的双微孔型光纤FP传感器在纯水中的反射光谱. 从中可以清楚看到, 干涉条纹既有高频变化的部分, 又有低频变化的部分, 分别对应着不同的干涉腔长. 由于两个微孔尺寸相同, 又都处在相同液体中, 形成的干涉腔数目减少, 所以其光谱形状并不是非常复杂.

通过对获得的输出光谱条纹进行快速傅里叶变化分析, 就可获得不同FP腔的OPD. 图2(b)是对图2(a)中光谱进行快速傅里叶变换后得到的频谱强度与光程差OPD的关系, 其中与A和B两个峰对应的OPD分别为 $2n_1L_1$ 和 $2(n_1L_1 + n_2L_2)$, 峰A附近其他较小峰则对应高阶谐频的产生^[7], 峰B左右幅度较小的峰则分别对应 $2n_2L_2$ 和 $2(n_1L_1 + 2n_2L_2)$. 计算获得的腔长为 $L_1 = 45.04 \mu\text{m}$, $L_2 = 967.87 \mu\text{m}$, 与实测尺寸 $L_1 = 43.0 \mu\text{m}$, $L_2 = 988.0 \mu\text{m}$ 基本符合. 同时也说明, 传感器的干涉光谱主要是由一个液体腔(M_1, M_2 组成, FP1)和一个单模光纤与液体腔(M_1, M_3 组成, FP2)组合而成, M_3 与 M_4 组成的FP内的液体腔起到衰减 M_4 反射面光强的作用, 简化了干涉谱形状.

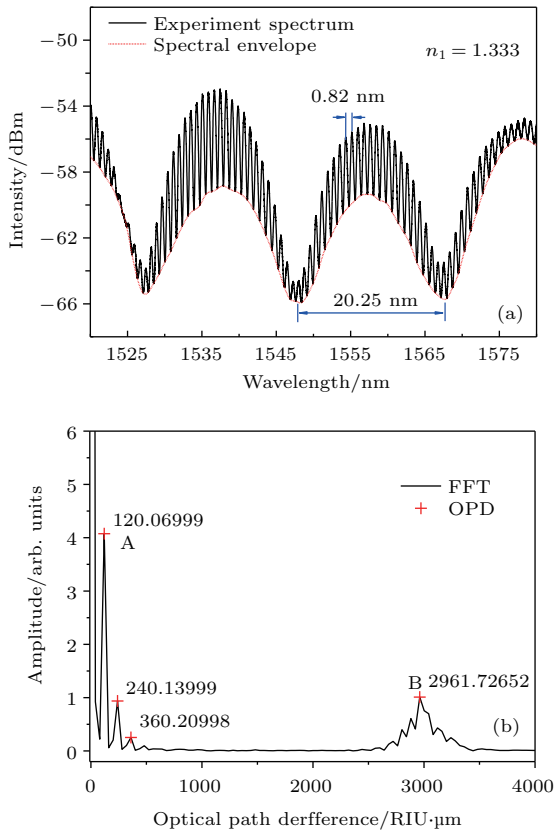


图2 双微孔结构全光纤FPI传感器反射光谱与对应的FFT谱 (a) 传感器反射光谱; (b) 反射光谱的FFT谱
Fig. 2. Reflection spectrum and corresponding fast Fourier transform (FFT) spectrum of dual micro-holes-based FFPI sensor: (a) Reflection spectrum of sensor; (b) FFT spectrum of reflection spectrum.

对于图1所示结构的传感器, 由于反射面 M_1 与 M_3 , M_2 与 M_4 两侧对应相同介质, 微腔面 M 很小(纤芯直径约 $8\ \mu\text{m}$), 可认为 $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$, $\alpha_1 = \alpha_3$, $\alpha_2 = \alpha_4$. 设入射光 $E_0 = 1$, 初始腔长、介质折射率、反射和损耗系数分别为: $L_1 = L_3 = 43.0\ \mu\text{m}$, $L_2 = 988.0\ \mu\text{m}$, $n_1 = 1.333$, $n_2 = 1.468$, $R_1 = 0.004$, $R_2 = 0.02$, $\alpha_1 = 0.4$, $\alpha_2 = 0.2$. 图3是模拟得到的传感器反射光谱, 对应的高、低频干涉条纹自由谱长度分别约为 0.78 和 $20.60\ \text{nm}$, 与实测光谱基本符合. 对于微小的强度差异, 应该与反射和传输损耗系数的选取有关, 但这些不影响通过条纹波长变化进行折射率和温度的传感测量.

将液体折射率从 1.333 增加到 1.343 , 每次增加 0.001 , 选取干涉光谱下包络 $1555\ \text{nm}$ 附近的谷值波长进行观测, 测得光谱包络波长随折射率增加显著线性增加, 对应灵敏度约为 $1150.153\ \text{nm}/\text{RIU}$; 由于光谱包络的移动, 高频干涉条纹功率相应发生显著变化, 虽然条纹波长随折射率增加线性增加, 但

灵敏度相比于光谱包络的移动明显减小, 对应灵敏度仅为 $45.452\ \text{nm}/\text{RIU}$.

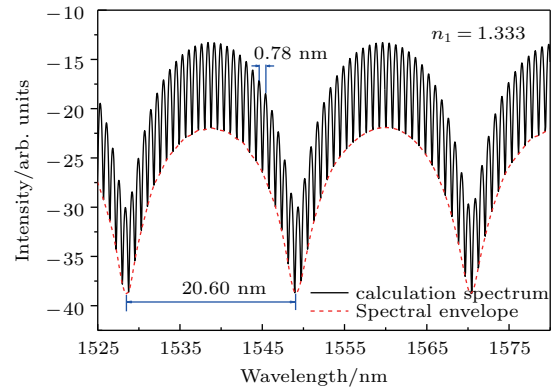


图3 传感器在折射率为1.333液体中的模拟光谱
Fig. 3. Calculation spectrum of proposed sensor with liquid RI of 1.333.

考虑温度引起的光纤热膨胀、弹光效应和液体热光效应对腔长和折射率的影响, 让温度从 $25\ ^\circ\text{C}$ 增加到 $125\ ^\circ\text{C}$, 每次增加 $\Delta T = 5\ ^\circ\text{C}$, 则FP1和FP2腔长的改变分别为 $\Delta L_1 = \alpha \cdot L_1 \cdot \Delta T$ 和 $\Delta L_2 = \alpha \cdot L_2 \cdot \Delta T$, 相应折射率变化分别为 $\Delta n_1 = \xi \cdot n_1 \cdot \Delta T$, $\Delta n_2 = \xi \cdot n_2 \cdot \Delta T$. 取光纤热光系数、热膨胀系数和纯水热光系数分别为 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $\xi = 6.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 和 $\zeta = -1.0 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ [19,20], 同样选光谱包络和 $1555\ \text{nm}$ 处细条进行分析, 模拟得到包络谱和高频干涉条纹均随温度线性增加, 对应温度灵敏度分别为 $-0.160, 0.004\ \text{nm}/^\circ\text{C}$.

4 实验研究与分析

图4是传感器加工系统装置原理图, 用于制作FP的光纤为普通单模光纤(SMF) ($9/125\ \mu\text{m}$, 长飞), 激光器(ATLEX-500, ATL, 德国)的脉冲能量、中心波长、频率和重复频率分别为 $30\ \text{mJ}$, $193\ \text{nm}$, $300\ \text{Hz}$ 和 $50\ \text{Hz}$. 首先, 将光纤涂覆层剥除约 $2\ \text{cm}$, 用酒精处理干净, 将其固定在三维精密调节平台(精度 $10\ \mu\text{m}$)上. 然后, 调整平台的 X 轴和 Y 轴, 使SMF的无涂覆层部分位于CCD视场中心. 接下来调节平台 Z 轴, 使经过矩形孔的光束聚焦在光纤上(先用可见红色激光源代替准分子激光器进行聚焦), 同时使CCD视点中心和激光焦点聚焦于同一点处. 完成以上步骤后, 便可打开紫外激光器照射光纤进行微孔加工. 加工过程中激光器输出能量以 $5\ \text{mJ}/\text{s}$ 增加, 每个微空用时 $5\text{--}8\ \text{s}$. 完成一个微孔

加工后, 移动平台沿纤维轴移动所需距离, 重复上述过程, 即可实现第二个微孔的加工. 最后, 将光纤从平台移开, 并使用2%氢氟酸液清洗微孔处的光纤碎屑, 完成微孔型FPI传感器制作. 图4(b)和图4(c)所示为制作的双微孔光纤FP传感器实物图片, 微孔长和宽度分别约为43.0和15.0 μm , 双孔间距988.0 μm , 孔深度已经贯穿光纤, 成为通孔, 有利于气体或液体的折射率测量, 图2(a)是传感器在23 $^{\circ}\text{C}$ 纯水中的实测反射光谱.

首先, 在室温条件下进行了空气压力的测试. 先将传感器输出端光纤连接到解调仪(SM125, 1 μm , 美国微光), 传感器后端光纤端面涂抹折射率匹配液, 然后将传感探头部分密封于自制的压力可调气室中. 可调气室的进气口安装有通气控制阀, 并通过软管与1.0 MPa气泵相连接. 实验时,

打开进气口控制阀缓慢充气, 压力值可通过安装在其上的压力表读出, 待压力到需要大小, 关闭控制阀并记录数据. 在室温条件下, 从0.1 MPa开始, 每增加0.1 MPa进行测量. 图5是获得的不同压力下的传感器反射光谱和压力响应曲线, 其中图5(a)插图给出的是滤掉高频后的光谱, 图5(b)是插图中A, B点处谷值波长与压力关系拟合曲线. 在室温环境中, 增加气体压强, 与FP1对应的低频干涉条纹明显移动, 而与FP2对应的高频干涉条纹几乎没有移动. 这主要源于压强改变引起的气体折射率变化, 而折射率变化引起了OPD的改变. 由于FP2的OPD远大于FP1的OPD, 相同的光程变化量, 对空气腔FP1光程的改变相对于FP2要明显得多, 所以空气与光纤介质组合腔FP2的细干涉条纹几乎没有移动.

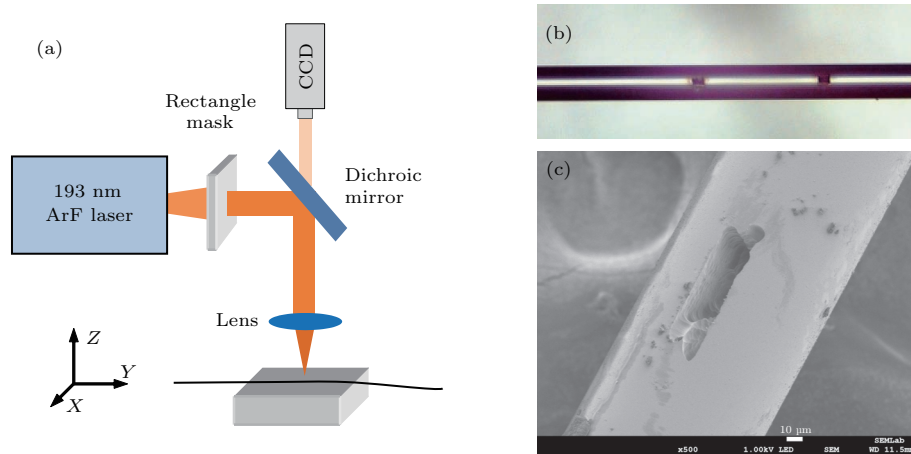


图4 传感器加工系统装置原理图与实物照片 (a) 系统装置原理图; (b) 光学显微镜下的微孔图像; (c) 扫描电镜下的微孔图像
Fig. 4. Schematic diagram of sensor processing device and micro-holes image photos: (a) Schematic diagram of processing installations; (b) microscope photo of dual micro-holes; (c) scanning electron microscope photo of single micro-hole.

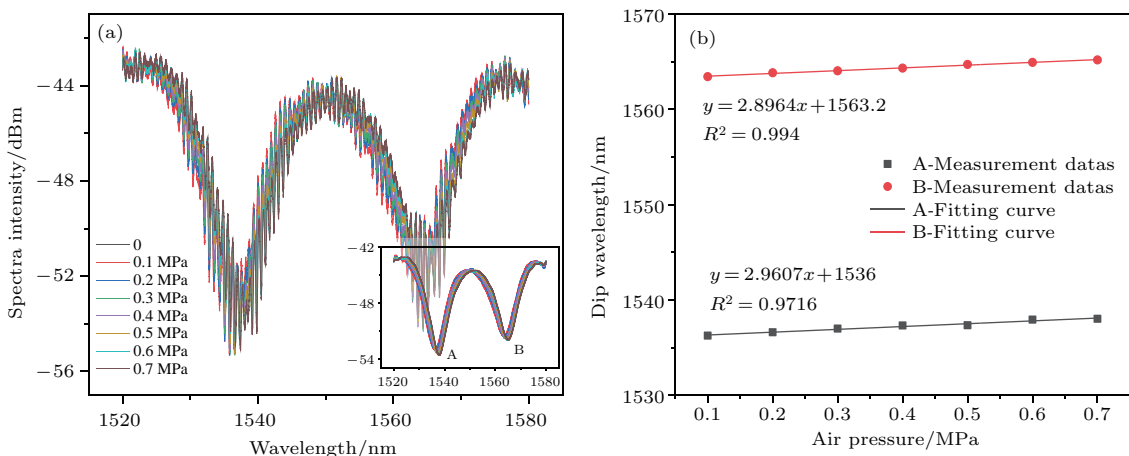


图5 不同气压下传感器反射光谱和波长压力响应关系 (a) 不同压力下的反射光谱; (b) 谷值波长随气压变化关系与拟合曲线
Fig. 5. Reflective spectra of sensor at different gas pressure and relation curves of wavelength versus gas pressure: (a) Reflective spectra with different gas pressure; (b) relations of dip wavelength versus gas pressure change and corresponding fitting curves.

通过测试, 对获得光谱利用 Origin 软件的滤波功能进行分析, 可获得低频干涉光谱条纹(图 5(a)插图所示). 传感器反射低频光谱的两个波谷对应的压力灵敏度为 2.896 和 2.961 nm/MPa. 若利用室温 (20—25 °C) 空气折射率-压强系数 2.637×10^{-3} RIU/MPa^[20] 进行折算, 传感器对应的折射率灵敏度可达到 1098.218 和 1122.867 nm/RIU, 与模拟计算获得的灵敏度相差很小, 可认为是温度变化引起的误差. 以空气中传感器的温度响应灵敏度为准, 气体温度与压力的交叉系数可达 0.004 MPa/°C. 因此, 如果解调设备的精度为 1 pm, 则传感器的折射率测量精度明显高于 1.0×10^{-6} RIU, 对应气体压力测量精度可达 0.3 kPa. 与文献 [14, 20, 21] 提出的微腔型 FP 气压传感器所达到的 1.82, 2.126 和 2.6 nm/MPa 灵敏度相比, 本文所设计传感器的气压灵敏度明显优于文献结果. 与

文献 [22, 23] 提出的基于光纤膜片腔体和特种光纤腔体结构的气压传感器相比, 灵敏度虽低数十倍, 但本文设计的传感器不需要制作微米级膜片和精确控制特种光纤长度以及多次切断熔接, 结构更易于实现, 而且具备多参数测量功能.

其次, 研究了室温环境中传感器对液体折射率的响应特性. 实验中, 分别将 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 和 2.0 g 纯度为 99.9% 的蔗糖溶入 20 mL 的蒸馏水中, 配置了十组不同浓度的蔗糖溶液. 利用阿贝折射仪测得其对应的折射率分别为 1.3348, 1.3362, 1.3375, 1.3388, 1.3402, 1.3413, 1.3428, 1.3443, 1.3450 和 1.3470. 实验过程中, 每次测试完成, 对传感器进行清洗, 使其对应光谱回到初态, 最后利用 Origin 软件进行高低频滤波分析. 图 6 是获得的不同折射率条件下的传感器反射光谱

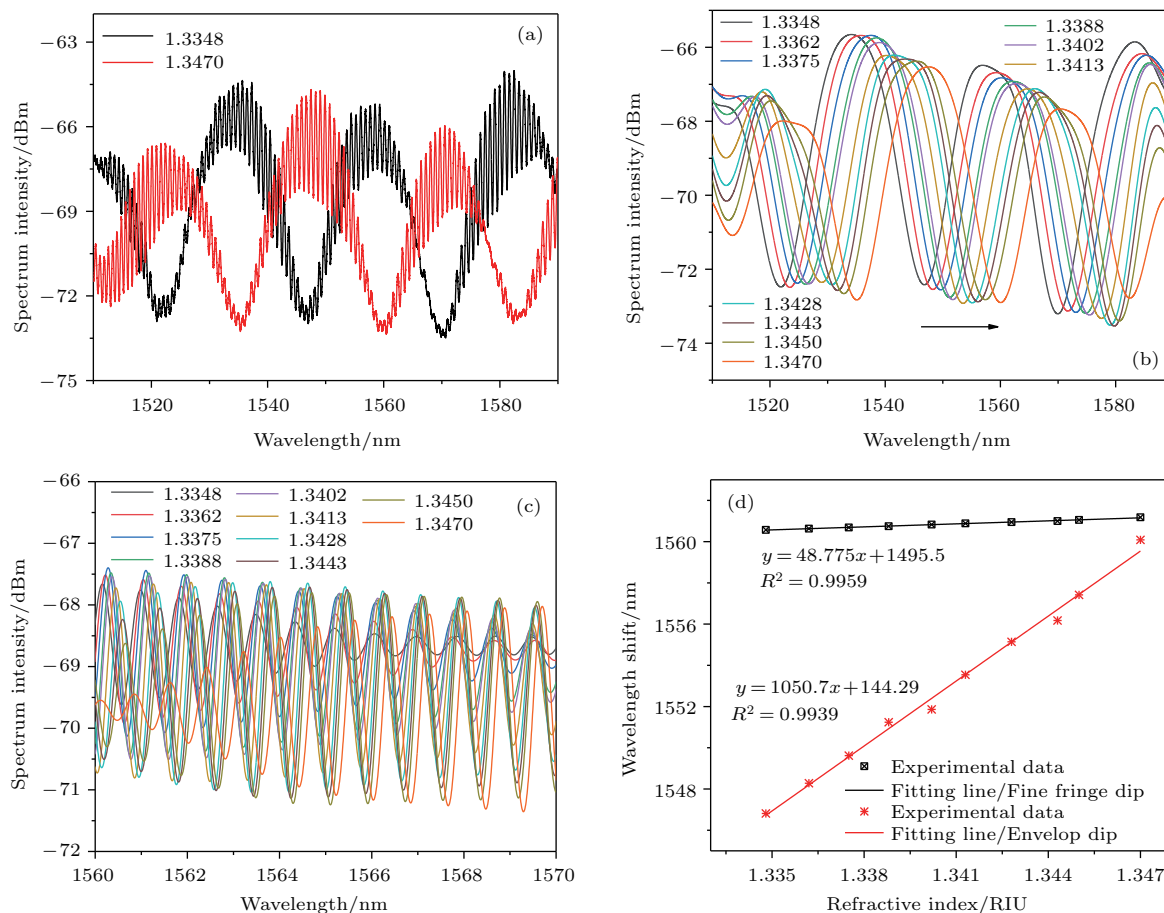


图 6 不同折射率条件下的传感器反射光谱和波长随折射率的变化 (a) 传感器在不同折射率液体中的反射光谱; (b) 经滤波后的 FP1 的反射光谱; (c) FP2 的原始反射光谱; (d) 反射波长随折射率变化曲线

Fig. 6. Reflection spectra of sensor at different refractive index and responsive curves of wavelength curves RI change: (a) Reflection spectra of sensor in liquid with different RI; (b) reflection spectrum of FP1 after filtering high frequency; (c) original reflection spectrum of FP2; (d) relation curves of reflection wavelength versus refractive index change.

和折射率响应曲线, 其中图 6(a) 和图 6(c) 是实测光谱, 图 6(b) 是滤掉高频后的光谱. 随着折射率的增加, 高低频干涉光谱均向长波方向移动, 线性度均达到 99% 以上, 只是对应的折射率灵敏度不同, 与 FP1 对应的低频干涉谱条纹随折射率变化的灵敏度为 1050.700 nm/RIU, 而与 FP2 对应的高频干涉谱移动的灵敏度仅为 48.775 nm/RIU.

实验中, 还研究了传感器的温度响应特性. 测试过程中, 调节水温从 30 °C 增加到 90 °C, 每 5 °C 记录一次测量结果. 利用 Origin 软件进行高低频滤波分析, 图 7 是传感器处在不同温度纯水中的反射光谱和温度响应曲线. 随着水温的升高, 与 FP1 对应的低频干涉谱发生紫移, 温度灵敏度和线性度分别为 -0.172 nm/°C 和 99.08%. 而与 FP2 对应的高频干涉条纹发生红移, 移动幅度明显比低频干涉条

纹小, 即 FP2 腔的温度灵敏度较小, 但具有较高的线性度, 温度灵敏度和线性度分别为 0.004 nm/°C 和 99.6%.

由于 FP1 的腔内介质是水, 温度变化引起的液体热光效应明显强于光纤的热膨胀效应, 致使波长相向短波方向移动. 但对于由液体腔和光纤腔组合而成的混合腔 FP2 而言, 由于液体腔长度远小于光纤腔的长度, 因此在温度的增加过程中, 虽然光纤的热膨胀效应占优势, 但液体的热光效应起到了削弱热膨胀效应的作用, 最终致使高频干涉条纹随温度增加向长波方向移动的灵敏度降低, 仅为 0.004 nm/°C. 如果合理地设计腔长, 可以实现高频条纹对温度的不敏感性, 进而可实现对温度的补偿.

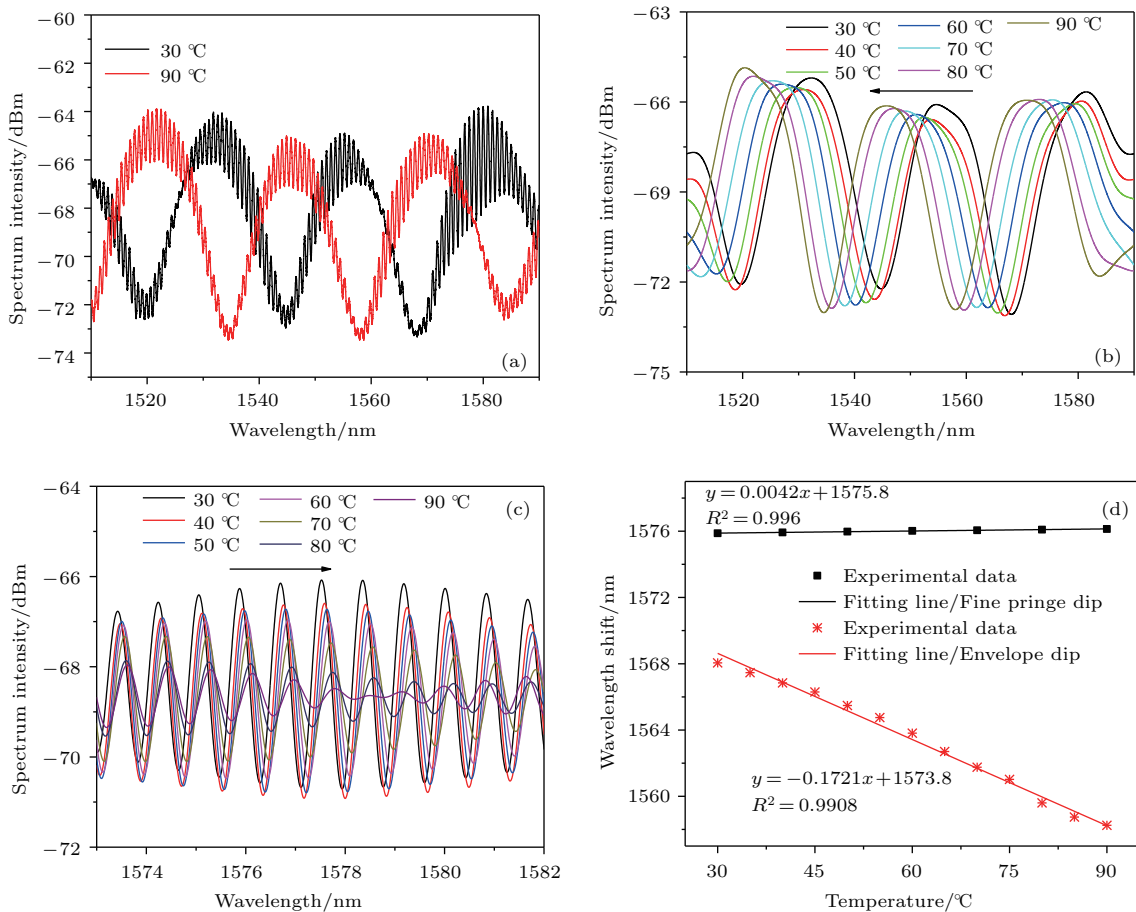


图 7 不同温度纯水中的反射光谱和温度响应曲线 (a) 传感器在不同温度纯水中的反射光谱; (b) 经滤波后的 FP1 的反射光谱; (c) FP2 的原始反射光谱; (d) 反射波长随温度变化曲线

Fig. 7. Reflection spectra of sensor in different temperature water and responsive curves of wavelength curves temperature change: (a) Reflection spectra of sensor in liquid with different temperature; (b) reflection spectrum of FP1 after filtering high frequency; (c) original reflection spectrum of FP2; (d) relation curves of reflection wavelength versus temperature change.

通过获得的实验数据, 可得FP1和FP2对应条纹的折射率/温度交叉系数分别为 -1.6×10^{-4} 和 8.2×10^{-5} RIU/ $^{\circ}\text{C}$. 因此, 如果要实现高于 10^{-5} RIU的折射率测量精度, 就必须考虑测量过程中温度的影响, 进行区分测量. 由于该传感器对折射率和温度有两套不同的响应灵敏度, 可利用它们构成系数矩阵, 形成如下关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FP1}} \\ \Delta\lambda_{\text{FP2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{T_1} & k_{n_1} \\ k_{T_2} & k_{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中 $\Delta\lambda_{\text{FP1}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{FP2}}$ 分别是与FP1和FP2对应的波长变化量. 由于 $k_{T_1} = -0.172$ nm/ $^{\circ}\text{C}$, $k_n = -0.172$ nm/ $^{\circ}\text{C}$, $k_{T_2} = 0.004$ nm/ $^{\circ}\text{C}$, $k_{n_2} = 48.775$ nm/RIU, 传感器的测量矩阵方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{-12.807} \begin{bmatrix} 48.775 & -1050.700 \\ -0.004 & -0.172 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FP1}} \\ \Delta\lambda_{\text{FP2}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

利用(8)式, 通过测量不同条纹的波长变化量, 便可实现温度和折射率的区分测量. 温度和折射率测量精度可达到 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 和 1.0×10^{-5} RIU, 与相关文献报道的温度和折射率区分测量^[24-26]相比, 该传感器具有较高的测量灵敏度和精度, 同时具有结构简单、体积微小的特点, 更适于对微量液体的温度与折射率区分测量.

5 结 论

本文提出并制作了一种基于双微孔复合腔结构的全光纤多参量FP干涉传感器, 进行了液体折射率、温度以及气体压力的传感实验. 研究表明, 利用准分子激光器在普通单模光纤加工微孔结构不仅是可行的, 而且制作的双微孔结构传感器具有规整的传感光谱; 此种传感器对液体折射率、温度变化具有优于99%的线性响应度和两套折射率、温度灵敏度, 大小分别为1050.700 nm/RIU, -0.172 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 和48.775 nm/RIU, 0.004 nm/ $^{\circ}\text{C}$, 与理论结果基本一致; 该结构传感器能用于折射率和温度区分测量, 可实现 1.0×10^{-5} RIU和 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 的测量精度, 也可用于气体压力的测试, 对应压力灵敏度可达2.961 nm/MPa, 测量精度为0.3 kPa, 而且具有良好的线性度.

参考文献

- [1] Hideaki M, Daichi W, Hirota I 2013 *Photonic Sens.* **3** 355
- [2] Huang Y, Tian Z, Sun L P, Sun D, Li J, Ran Y, Guan B O 2015 *Opt. Express* **23** 26962
- [3] Pablo Z, Jesus M C, Carlos R Z, Ignacio R M, Francisco J A 2016 *IEEE Sens. J.* **16** 4798
- [4] Liao C R, Hu T Y, Wang D N 2012 *Opt. Express* **20** 22813
- [5] Li L, Xia Li, Xie Z H, Liu D M 2012 *Opt. Express* **20** 11109
- [6] Xu L, Jiang L, Wang S, Li B, Lu Y 2013 *Appl. Opt.* **52** 2038
- [7] Wang D, Cheng T H, Yeo Y K, Liu J G, Xu Z W, Wang Y X, Xiao G X 2010 *Opt. Express* **18** 10343
- [8] Li Z L, Liao C R, Liu S, Wang Y P 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 070708 (in Chinese) [李白亮, 廖常锐, 刘申, 王义平 2017 物理学报 **66** 070708]
- [9] Zhu Y Z, Cooper K L, Pickrell G R, Wang A 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 861
- [10] Antunes P F C, Domingues M F F, Alberto N J, Andre P S 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 78
- [11] Jiang L, Zhao L J, Wang S M, Yang J P, Xiao H 2011 *Opt. Express* **19** 17591
- [12] Nesson S, Yu M A, Zhang X M, Hsieh A H 2008 *J. Biomed. Opt.* **13** 044040
- [13] Yang F, Tan Y Z, Jin W, Lin Y C, Qi Y, Ho H L 2016 *Opt. Lett.* **41** 3025
- [14] Dominguesa M F, Antunesa P, Albertob N, Friasa R, Ferreirac R A S, Andréd P 2016 *Measurement* **77** 265
- [15] Chen LX, Huang X G, Li J Y, Zhong Z B 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 053113
- [16] Rao Y J, Deng M, Duan D W, Zhu T 2008 *Sens. Actuators A* **148** 33
- [17] Xu B, Liu Y M, Wang D N, Li J Q 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 4920
- [18] Gao S, Jin L, Ran Y, Sun L P, Li J, Guan B O 2012 *Opt. Express* **20** 18281
- [19] Sun D, Ran Y, Wang G 2017 *Sensors (Basel)* **17** 2559
- [20] Xu B, Liu Y M, Wang D N, Jia D G, Jiang C 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 7102309
- [21] Wang R H, Qiao X G 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 245
- [22] Zhang Y, Yuan L, Lan X, Kaur A, Huang J, Xiao H 2013 *Opt. Lett.* **38** 4609
- [23] Quan M, Tian J, Yao Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 4891
- [24] Ma Q F, Ni K, Huang R 2017 *J. Optoelectronics-Laser* **28** 123 (in Chinese) [马启飞, 倪凯, 黄然 2017 光电子·激光 **28** 123]
- [25] Liu J B, Wang D N, Zhang L 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 4872
- [26] Shi F F, Zhao C L, Xu B, Wang D N 2016 *Acta Photonica Sin.* **45** 0306003 (in Chinese) [时菲菲, 赵春柳, 徐贲, 王东宁 2016 光子学报 **45** 0306003]

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

Zhang Wei¹⁾ Liu Ying-Gang^{2)†} Zhang Ting²⁾ Liu Xin²⁾ Fu Hai-Wei²⁾ Jia Zhen-An²⁾

1) (School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

2) (Key Laboratory of Photoelectric Oil and Gas Logging and Testing, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(Received 25 March 2018; revised manuscript received 24 June 2018)

Abstract

A kind of dual micro-holes-based in-fiber Fabry-Perot interferometer sensor is proposed in this paper. The theoretical model of the reflection spectrum of proposed sensor is established based on the interference among four light beams, where both the relationships of the spectrum intensity with the length of micro-hole, refractive index (RI) of medium in cavity, transmission loss and reflection loss, and the characteristic parameters of fiber are demonstrated, and the temperature and RI responses of reflection spectra are also simulated. Through machining two micro-holes in single-mode fiber with 193 nm excimer laser, we fabricate the proposed fiber sensor which can be used for measuring the multi-physical quantities, and the corresponding experiments are demonstrated simultaneously. The results show that the sensor has better linear responses to temperature and RI change, and the corresponding linearity is superior to 99%. Due to having two sets of different temperature and RI sensitivities (i.e. $-0.172 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ and $1050.700 \text{ nm}/\text{RIU}$; $0.004 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ and $48.775 \text{ nm}/\text{RIU}$) and better linearity, this kind of sensor can be used for measuring the temperature, the ambient RI and even the simultaneous discrimination of temperature and ambient RI. The RI and temperature resolutions are $1.0 \times 10^{-5} \text{ RIU}$ and $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. Furthermore, the sensor can also be used for sensing the gas pressure, and its measurement accuracy can reach to 3 kPa . Owing to its high sensitivity, stability, small volume and easy fabrication, the sensor will be widely used in sensing technology.

Keywords: fiber sensor, Fabry-Perot interferometer, temperature, refractive index

PACS: 42.81.Pa, 42.81.Bm, 78.20.Bh

DOI: [10.7498/aps.67.20180528](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180528)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61240028) and the Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province, China (Grant No. 2013JM8032).

† Corresponding author. E-mail: ygliu@xsyu.edu.cn