光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023112401

基于 FBG 和 F-P 的温度和折射率双参量传感器

姚国珍[1,2,3]，宗子天[1*]，吴玉章[1]，李炳峰[1]，颜炳欣[1]，尚秋峰[1,2,3]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 提出了一种由单模布拉格光栅和多模 Fabry-Perot 腔级联而成的温度和折射率双参量传感器。对多模光纤的末端采用氢氟酸进行腐蚀，在腐蚀后形成的凹陷处填充紫外胶，从而形成 Fabry-Perot 腔。Fabry-Perot 腔和单模光纤布拉格光栅级联后，构成最终的传感结构。Fabry-Perot 腔对温度和折射率敏感，而光纤布拉格光栅对温度敏感而对折射率不敏感。利用上述特性，采用灵敏度矩阵法可实现对温度和折射率的同时测量。实验结果表明，传感器的温度和折射率灵敏度分别为－0.483 2 nm/℃和－508.64 pm/RIU。该传感器具有制作工艺简单、结构紧凑、成本低、灵敏度高的优点，有很好的应用前景。

关键词： 温度和折射率传感；Fabry-Perot 腔；光纤布拉格光栅；多模光纤

中图分类号： TN253；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0349－07

Temperature and Refractive Index Sensor Based on Multimode Fiber Cascaded Fabry-Perot Cavities

YAO Guozhen[1,2,3], ZONG Zitian[1], WU Yuzhang[1], LI Bingfeng[1], YAN Bingxin[1], SHANG Qiufeng[1,2,3]

(1. Department of Electronic and Communications Engineering; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology; 3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: A temperature and refractive index dual-parameter sensor composed of a cascade of a single-mode fiber Bragg grating and a multi-mode Fabry-Perot cavity is proposed. The end of the multi-mode optical fiber is etched with hydrofluoric acid, and then the depression formed after etching is filled with ultraviolet glue to form a Fabry-Perot cavity. The Fabry-Perot cavity and the single-mode fiber Bragg grating are cascaded to form the sensing structure. The Fabry-Perot cavity is sensitive to temperature and refractive index, while the fiber Bragg grating is sensitive to temperature but not to refractive index. Using the above characteristics, the sensitivity matrix method can be used to achieve simultaneous measurement of temperature and refractive index. Experimental results show that the temperature and refractive index sensitivities of the sensor are －0.4832 nm/℃ and －508.64 pm/RIU, respectively. The sensor has the characteristics of a simple manufacturing process, compact structure, low cost, and high sensitivity, and has good application prospects.

Key words: temperature and refractive index sensing; Fabry-Perot cavities; fiber Bragg grating; multi-mode optical fiber

收稿日期：2023－11－24.

基金项目：国家自然科学基金项目(62205105)；河北省自然科学基金项目(E2019502179)；河北省省级科技计划项目(SZX2020034).

* **通信作者：**宗子天

0 引言

近年来，利用光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）、马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）和法布里-珀罗干涉仪（Fabry-Perot Interferometer，FPI）等结构实现温度和折射率传感的研究备受关注[1]。

利用FBG进行温度和折射率传感时，一般是通过在FBG外部涂覆聚合物实现。2007年，Chen等[2]通过在FBG上涂覆聚酰亚胺和丙烯酸酯实现了温度和折射率测量，其灵敏度分别为0.010 2 nm/℃和0.038 nm/RIU。该传感器的灵敏度较低，限制了传感器的使用场景。2017年，Luo等[3]通过在涂覆聚合物的FBG上进行蚀刻，提高了传感器的灵敏度，但是经过蚀刻后的光纤结构强度会变低，缩短了传感器的使用寿命。

采用微纳加工技术，可在光纤上形成MZI或FPI结构，从而利用干涉原理实现温度和折射率测量。2011年，Nguyen等[4]利用聚焦离子束在单模光纤中铣削出一个可以允许液体进入的开放型F-P腔结构，从而实现液体温度和折射率的同时测量。2017年，Chen等[5]提出了在多模光纤末端形成F-P腔结构的压力传感器，压力灵敏度为－40.94 nm/MPa，但该传感器存在温度交叉敏感问题。2018年，Zhao等[6]通过在多模光纤中间插入一段偏移的悬芯光子晶体光纤实现了温度和盐度的测量，传感器的温度灵敏度为1.486 nm/℃，盐度灵敏度为2.495 nm/‰。同年，Zhao等[7]提出了一种基于C型光纤的用于温度和盐度测量的表面等离子体共振结构，灵敏度分别为－7.61 nm/℃和1.402 nm/‰。2019年，Wang等[8]提出了一种单模光纤和氟化聚酰亚胺光纤混合的MZI结构，用来监测海洋的温度和盐度，灵敏度分别为0.14 nm/℃和0.064 nm/‰。同年，Flores等[9]提出了一种带有空气腔的单模光纤和多模光纤组成的温度和折射率传感器，灵敏度分别为0.01 pm/℃和24 nm/RIU。2020年，Dong等[10]提出一种由激光器制作的对称双槽结构MZI温度传感器，在20～90 ℃范围内，其温度灵敏度为0.23 nm/℃。2021年，Zheng等[11]在一种结构中集成了MZI和FPI，并在反射面采用特殊镀膜技术实现了海水的温度和盐度同时测量，温度和盐度灵敏度分别为0.4 nm/℃和2.7 nm/‰。同年，Zhao等[12]提出了一种基于FPI和MZI混合结构的光纤传感器，温度和折射率的灵敏度分别为2.176 nm/℃和－2.323 nm/‰。2023年，Zhang等[13]通过在单模光纤端面涂覆两种和厚度的紫外胶实现了环境温度和湿度的同时测量，该传感器的最高湿度和温度灵敏度分别为－0.387 3 nm/RH和－0.533 nm/℃。同年，Fu等[14]提出了一种由单模-多模-单模-多模-单模光纤结构与聚二甲基硅氧烷微腔组成的传感结构，在15～45 ℃的温度范围内，温度灵敏度最高可达0.567 8 nm/℃。

近年来，研究人员提出了将MZI或FPI等微纳结构与FBG相结合的传感结构，以进一步提升传感性能。2023年，张琪等[15]提出了一种单模-多模-单模光纤级联FBG的结构，用于测量温度和应变双参量，其灵敏度分别为28.79 pm/℃和－2.31 pm/με。

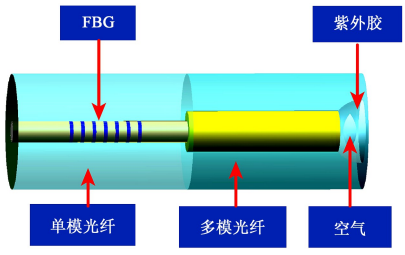
综上，利用FBG，MZI和FPI等结构可实现温度和折射率的传感。普通FBG的灵敏度较低，且想要在单一传感器结构上实现多参量测量，需要设计较为复杂的结构。将FBG与MZI或FPI相结合不仅可以提高灵敏度，而且可以实现更大的测量范围和测量精度。

本文提出一种单模光纤FBG与多模光纤F-P腔级联的新型光纤传感器。该传感器制作工艺简单、结构紧凑，可实现温度和折射率的同时测量。同时，由于多模光纤的纤芯直径较大，从而与外界环境接触面积较大，可提高传感器的灵敏度和响应速度。

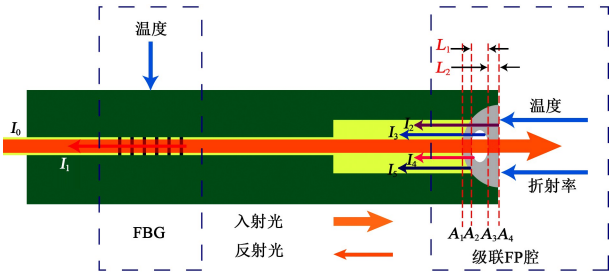
1 基本原理及仿真

1.1 传感器结构及制作

传感器由单模光纤中的FBG和多模光纤F-P腔级联构成。F-P腔在多模光纤的末端，由低折射率UV胶构成的腔及空气腔级联而成。多模光纤的另一端熔接了一段单模光纤，并采用常规的掩膜板方法在单模光纤中刻写了FBG。传感器的结构如图1所示。



（a）三维图



（b）截面图

图 1　传感器结构示意图

传感器制作时，首先将一段多模光纤和刻有 FBG 的一段单模光纤熔接在一起。然后在多模光纤末端腐蚀出锥形结构，并将紫外胶填充进锥形结构中。为了形成空气腔，填充时保留部分空气在紫外胶中。由于光纤纤芯、紫外胶、空气和被测环境的折射率不同，形成了四个光反射面，从而构成级联 F-P 腔，封装前后传感器实物图如图 2 和图 3 所示。

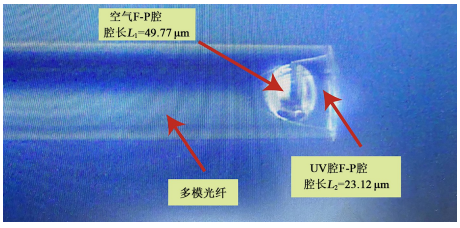


图 2　封装前传感器级联 F-P 腔部分的实物图

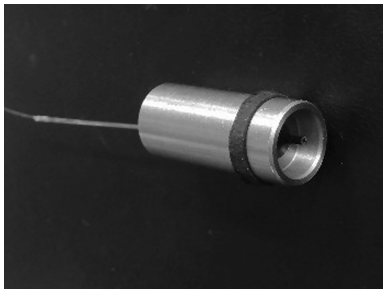


图 3　封装后传感器实物图

1.2　传感器工作原理

图 1(b)给出了传感器内部光传输的示意图。当强度为 I_0 的入射光进入单模光纤后，满足布拉格条件的光被反射，形成强度为 I_1 的反射光，其余光进入多模光纤中。在多模光纤末端，光纤纤芯、紫外胶、空气和被测环境四种介质的折射率均不相同，所以形成四个反射面：光纤纤芯与紫外胶形成的反射面 A_1，紫外胶与空气形成的反射面 A_2，空气与紫外胶形成的反射面 A_3，紫外胶与被测环境介质形成的反射面 A_4，上述四个反射面反射回的光强分别为 I_5，I_4，I_3 和 I_2。

反射面的反射率由两侧介质的折射率决定，折射率差越大，反射率越大，其反射率可由式(1)表示为：

$$R=\frac{(n_2-n_1)^2}{(n_2+n_1)^2} \tag{1}$$

式(1)中，n_1 和 n_2 分别表示反射面两侧介质的折射率。多模光纤纤芯的折射率为 1.46，紫外胶的折射率为 1.54，两者比较接近。由式(1)可知，折射率反射面 A_1 的反射率较低，其返射回的光强 I_5 可以忽略不计，所以，光强分别为 I_2，I_3 和 I_4 的反射光两两发生干涉。根据多光束干涉理论，传感器的反射谱可表示为：

$$I_R(\lambda)=I_0\cdot R_{\mathrm{FBG}}(\lambda-\lambda_{\mathrm{B}})\cdot\left[2I_2+2I_3+2I_4+2\sqrt{I_2I_3}\cos\frac{4\pi L_2 n_{\mathrm{UVG}}}{\lambda}+2\sqrt{I_2I_4}\cdot\cos\frac{4\pi(L_1n_{\mathrm{AIR}}+L_2n_{\mathrm{UVG}})}{\lambda}+2\sqrt{I_3I_4}\cos\frac{4\pi L_1 n_{\mathrm{AIR}}}{\lambda}\right] \tag{2}$$

式(2)中，函数 R_{FBG} 表示 FBG 的反射率，λ_{B} 表示 FBG 的反射波长，n_{AIR} 为空气的折射率，n_{UVG} 为紫外胶的折射率，λ 为光波长，L_1 和 L_2 分别为空气和紫外胶构成的腔的长度。

当环境温度发生变化时，由于热胀冷缩效应，F-P 腔的腔长将发生变化，从而引起传感器反射谱发生变化。通过测量反射谱波长的变化量，即可实现温度传感。

由式(1)可知，A_4 反射面的反射率为：

$$R_4=\frac{(n_{\mathrm{UVG}}-n_{\mathrm{med}})^2}{(n_{\mathrm{UVG}}+n_{\mathrm{med}})^2} \tag{3}$$

式(3)中，n_{med} 为外界环境的折射率。由式(3)可知，外界环境折射率变化会导致反射面反射率的改变，从而引起式(2)中反射面 A_4 的反射光强 I_2 变化，最终导致反射谱波长发生变化。故通过测量反射谱波长的变化量，即可实现外界环境的折射率传感。

传感器级联 F-P 腔部分的反射谱同时受外界环境温度和折射率影响，即其波长可表示为外界环境温度和折射率的函数：

$$\lambda_{\mathrm{F\text{-}P}}=f_1(T,n_{\mathrm{med}}) \tag{4}$$

FBG 对温度和应变都敏感，而在本文所提结构中，FBG 只用于温度传感。所以，应用时，要确保 FBG 不受应变影响，此时，其反射波长可表示为：

$$\lambda_{\mathrm{B}}=f_2(T) \tag{5}$$

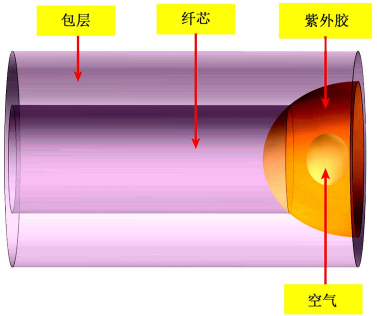
通过 FBG 测得的温度，可消除级联 F-P 腔波长

变化中温度带来的影响，从而测得折射率的变化。所以，利用级联 F-P 腔和 FBG，可实现温度和折射率的同时测量。

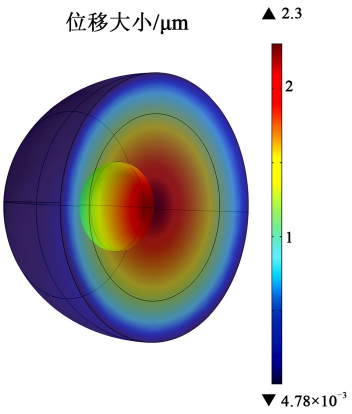
2 仿真和实验测试

2.1 温度和折射率特性仿真

为了研究级联 F-P 腔的腔长随温度的变化情况，建立了级联 F-P 腔的有限元模型，如图 4(a)所示。设置有限元模型中的空气腔长度为 50 μm，设置末端紫外胶构成的腔的长度为 23 μm，上述尺寸与研制的传感器尺寸保持基本一致。将有限元模型的环境温度由 25 ℃升高至 50 ℃，图 4(b)给出了温度变化导致的 F-P 腔形变变化。可以看出，F-P 腔的不同位置发生的形变不同。中心位置的形变最大，说明腔长发生了较大的变化；紫外胶与光纤的接触面处位移较小，这是光纤的杨氏模量和热膨胀系数较低导致的。



(a) 有限元模型



(b) 形变大小分布

图 4 级联 F-P 腔的温度特性仿真模型

在仿真软件中设置环境的初始温度为 25 ℃，目标温度为 50 ℃，步长为 5 ℃，可获得 F-P 腔的形变和温度的关系，如图 5 所示。由图 5 可以看出，F-P 腔的形变随着温度的升高呈线性变化。

根据式(2)可获得级联 F-P 腔的反射谱随折射率的变化情况。设置折射率的变化范围为 1.333 3～1.354 0，所获得的反射谱的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知，随着折射率的增大，光谱向短波长方向漂移。

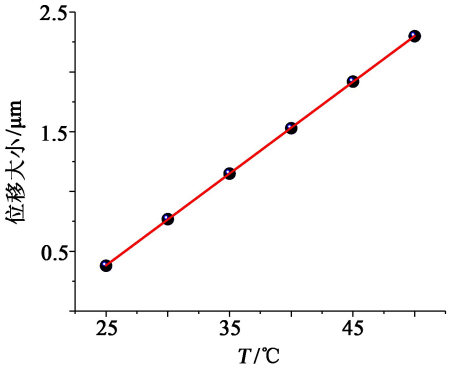


图 5 不同温度下 F-P 腔的形变变化

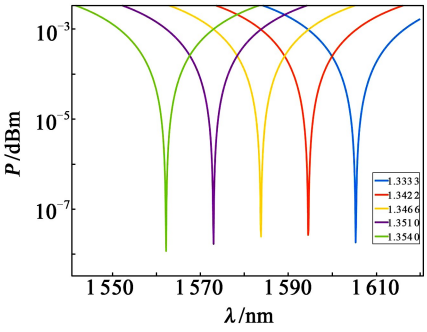


图 6 不同折射率下 F-P 腔的反射谱

由仿真结果可知，通过检测级联 F-P 腔反射谱波长的变化，即可获得外界温度或折射率变化。

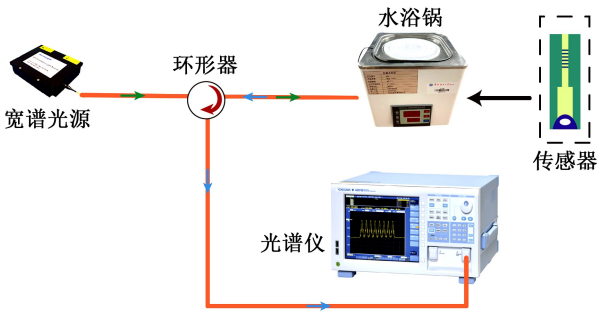
2.2 实验测试

2.2.1 温度特性测试

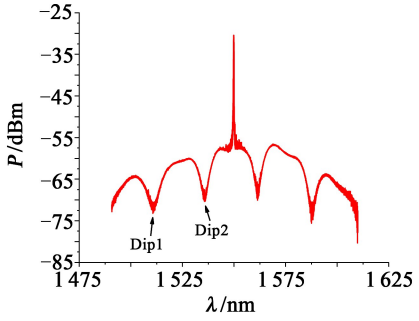
用于传感器温度特性测试的实验装置如图 7(a)所示，主要包括宽谱光源、水浴锅和光谱仪等设备。宽谱光源发出的光经环形器进入到传感器中，传感器的反射光经环形器另一端送入光谱仪中进行显示。为了获得稳定的温度环境，将传感器放置在精度为 0.1 ℃的水浴锅中进行测试。水的流动会影响测试结果，所以实验时将传感器插入到一段长度为 5 cm、直径为 200 μm 的玻璃管中，以减少水浴锅中水的流动对传感器造成的振动。制作出的传感器反射谱如图 7(b)，其中，中间的峰为 FBG 形成反射峰，其余部分则为级联 F-P 腔形成的干涉谱。

实验时，设置水浴锅的水温由 25 ℃升高至 50 ℃，步进为 5 ℃。为确保传感器的温度达到稳定状态，水浴锅显示的水温稳定后，等待 10 分钟再读取光谱仪的结果。传感器反射谱随温度的变化如图 8 所示，可见，随着温度升高，波长向短波长方向漂移。

分别对图 7(b)中 Dip1 和 Dip2 两个波谷对应的波长和温度进行拟合，可获得两个波谷波长和温度的关系，如图 9 所示。由图 9 可知，Dip1 和 Dip2 两个波谷的温度灵敏度分别为－413.3 和－483.2 pm/℃，拟合线性度分别为 0.954 5 和 0.997 3。



(a) 实验装置



(b) 传感器反射谱

图 7　温度特性测试

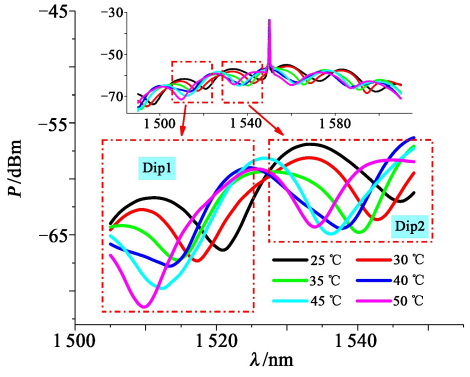


图 8　反射谱随温度的变化

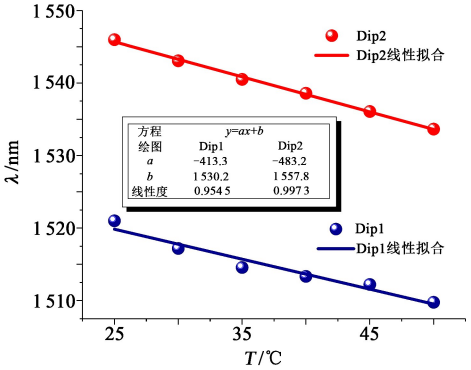


图 9　反射谱两个波谷的温度灵敏度

FBG 的反射谱随温度的变化情况如图 10 所示，可见，随着温度升高，波长向长波长方向漂移。对反射谱的波长和温度进行线性拟合，可获得 FBG 的温度特性，如图 11 所示，其灵敏度为 16.9 pm/℃，线性度为 0.999 8。

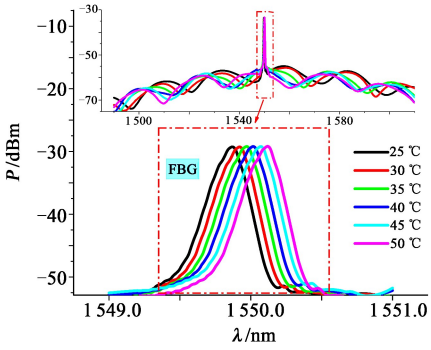


图 10　FBG 反射谱随温度的变化

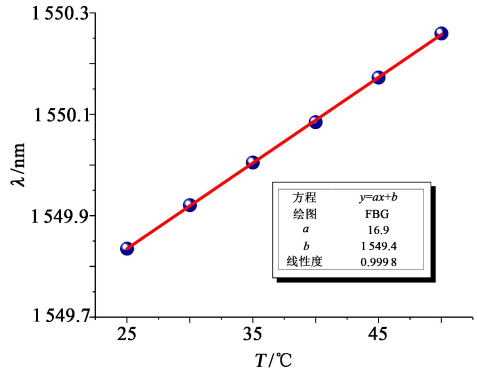


图 11　FBG 温度灵敏度

2.2.2　折射率特性测试

由于不同浓度的氯化钠溶液的折射率也不同，在进行折射率特性测试时，采用了不同浓度的氯化钠溶液作为测试对象。共配置了五种不同折射率的溶液，溶液浓度分别为 0%，5%，7.5%，10%和 12.5%，在室温 20 ℃下，其对应的折射率分别为 1.333 3，1.342 2，1.346 6，1.351 0 和 1.354 0。实验时采用的实验系统与图 7(a)类似，需要将其中的水浴锅更换为注射器。实验时，将溶液吸入注射器内，然后将传感器放进注射器的入口处进行测试，这样可避免溶液蒸发影响其折射率。每次更换溶液时，用清水将传感器头冲洗干净，确保其光谱恢复到初始状态。

传感器反射谱随折射率的变化如图 12 所示。由图 12 可知，随着折射率的增大，波长向短波长方向漂移。分别对 Dip1 和 Dip2 两个波谷对应的波长和折射率进行拟合，获得传感器波长和折射率的关系，如图 13 所示。两个波谷的灵敏度分别为－487.2 和－508.64 pm/RIU，线性度分别为 0.946 9 和 0.955 7。

因为 FBG 不受折射率的影响，所以光谱图没有变化，灵敏度为 0。

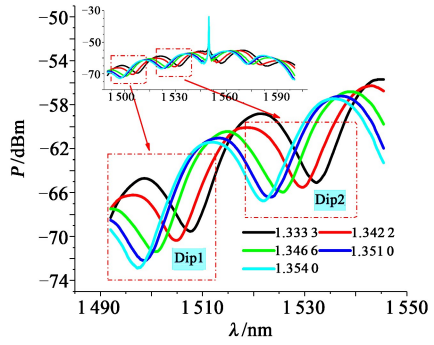


图 12 反射谱随折射率的变化

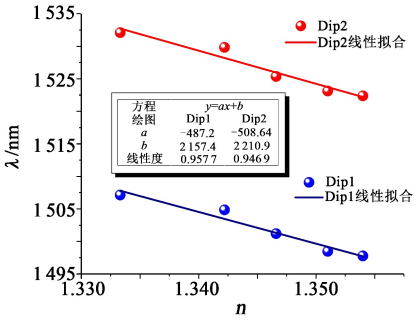


图 13 反射谱两个波谷的折射率灵敏度

2.2.3 温度和折射率同时测量

由上述实验可知，多模光纤 F-P 腔对温度和折射率敏感，所以当反射谱波长发生变化时，无法区分是温度变化还是折射率变化所导致的，也就无法实现温度和折射率的同时测量。单模光纤中的 FBG 只对温度敏感，对折射率不敏感，所以可通过 FBG 获得温度的变化，从而进一步通过多模光纤 F-P 腔获得折射率的变化。

在实际应用中，当温度和折射率同时变化时，设各自的变化量分别为 ΔT 和 ΔS，F-P 腔和 FBG 的波长变化可以表示为如下矩阵：

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{\mathrm{FPI}}\\ \Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}K_{\mathrm{S,FPI}} & K_{\mathrm{T,FPI}}\\ K_{\mathrm{S,FBG}} & K_{\mathrm{T,FBG}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta S\\ \Delta T\end{bmatrix} \tag{6}$$

式(6)中，$\Delta\lambda_{\mathrm{FPI}}$ 和 $\Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}$ 分别表示 F-P 腔和 FBG 的波长变化量，$K_{\mathrm{S,FPI}}$ 和 $K_{\mathrm{T,FPI}}$ 分别表示 FPI 结构的折射率和温度灵敏度，$K_{\mathrm{S,FBG}}$ 和 $K_{\mathrm{T,FBG}}$ 分别为 FBG 的折射率和温度灵敏度。

将实验测得的 F-P 腔和 FBG 的温度和折射率灵敏度系数代入上式中，可得：

$$\begin{bmatrix}\Delta S\\ \Delta T\end{bmatrix}=\frac{1}{8\,596.016}\begin{bmatrix}16.9 & 483.2\\ 0 & -508.64\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{\mathrm{FPI}}\\ \Delta\lambda_{\mathrm{FBG}}\end{bmatrix} \tag{7}$$

因此，只需要获得 F-P 腔和 FBG 波长的变化量，代入式(7)就可得到外界环境的温度和折射率变化量，实现温度和折射率同时测量。

3 总结

本文提出了一种新型基于 F-P 干涉原理的温度与折射率同时测量传感器，该传感器由多模光纤末端的级联 F-P 腔及单模光纤中的 FBG 构成。传感器利用级联 F-P 腔进行温度和折射率传感，利用 FBG 消除级联 F-P 腔的温度和折射率的交叉敏感影响，实现温度和折射率的同时测量。对级联 F-P 腔的温度特性和折射率特性进行了仿真分析，并选取了传感器反射谱中的两个波谷进行实验测试。实验结果表明，温度灵敏度为－483.2 pm/℃，折射率灵敏度为－508.64 pm/RIU。传感器具有制作工艺简单、结构紧凑、制造成本低等优点。

参考文献：

[1] Liu Y, Liu X, Zhang T, et al. Integrated FPI-FBG composite all-fiber sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature[J]. Opt. Lasers Eng., 2018, 111: 167-171.

[2] Chen Q, Lu P, Men L. Simultaneous temperature and salinity monitoring with a fiber optic sensor[J]. Proc. SPIE, 2007, 6756: 43-48.

[3] Luo D, Ma J, Ibrahim Z, et al. Etched FBG coated with polyimide for simultaneous detection the salinity and temperature[J]. Opt. Commun., 2017, 392: 218-222.

[4] Nguyen L V, Vasiliev M, Alameh K. Three-wave fiber Fabry-Pérot interferometer for simultaneous measurement of temperature and water salinity of seawater[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2011, 23(7): 450-452.

[5] Chen W P, Wang D N, Xu B, et al. Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement[J]. Sci. Rep., 2017, 7(1): 368.

[6] Zhao J, Zhang Y, Liu Y, et al. Lateral offset optical fiber modal interferometer sensor for simultaneous measurement of seawater temperature and salinity[J]. Opt. Fiber Technol., 2021, 67: 102737.

[7] Zhao Y, Wu Q, Zhang Y. Theoretical analysis of high-sensitive seawater temperature and salinity measurement based on C-type micro-structured fiber[J]. Sens. Actuators, B, 2018, 258: 822-828.

[8] Wang S, Liu T, Wang X, et al. Hybrid structure Mach-Zehnder interferometer based on silica and fluorinated polyimide microfibers for temperature or salinity sensing in seawater[J]. Measurement, 2019, 135: 527-536.

[9] Flores R, Janeiro R, Viegas J. Optical fibre Fabry-Perot

interferometer based on inline microcavities for salinity and temperature sensing[J]. Sci. Rep., 2019, 9(1): 9556.

[10] Dong J, Sang M, Wang S, et al. A novel Mach-Zehnder interferometric temperature sensor based on a symmetrical double-grooved structure[J]. IEEE Sens. J., 2020, 20(24): 14850-14856.

[11] Zheng H, Zhao Y, Lv R, et al. Study on the temperature and salinity sensing characteristics of multifunctional reflective optical fiber probe[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2021, 70: 1-8.

[12] Zhao Y, Zhao J, Peng Y, et al. Simultaneous measurement of seawater salinity and temperature with composite fiber-optic interferometer[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2022, 71: 1-8.

[13] Zhang T, Han Q, Liang Z, et al. A Fabry-Perot sensor with cascaded polymer films based on vernier effect for simultaneous measurement of relative humidity and temperature[J]. Sensors (Basel), 2023, 23(5): 2800.

[14] Fu R, Yan X, Cheng T, et al. FPI and MZI combined high-sensitivity sensor based on PDMS microcavity[J]. Opt. Fiber Technol., 2023, 77: 103284.

[15] 张　琪，何　巍，刘砚涛，等. 基于 SMS-FBG 结构的温度应变双参数传感特性研究[J]. 半导体光电，2023，44(2)：215-221.

Zhang Qi, He Wei, Liu Yantao, et al. Research on temperature strain dual-parameters sensing characteristics based on SMS-FBG structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(2): 215-221.

作者简介：

姚国珍(1979—)，男，河北省衡水市人，博士，硕士生导师，主要研究方向为光纤传感与信号处理技术；

宗子天(1999—)，男，河北省石家庄市人，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感。