

doi: 10.3788/gzxb20154410.1006002

可双参量同时测量的干涉型全光纤传感器

曹晔, 赵晨, 童峥嵘

(天津理工大学 计算机与通信工程学院 天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

摘 要:提出并制作了一种马赫增德干涉仪级联光纤布喇格光栅的全光纤传感器,其中马赫增德干涉仪由两个球形结构组成,起分光器和耦合器的作用.分析了各项结构参量对灵敏度的影响,结果表明马赫增德干涉峰和光纤布喇格光栅的透射峰对不同参量的灵敏度不同.实验测得马赫增德干涉峰对温度、折射率和液位的灵敏度分别为 $0.07245 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 、 $87.65 \text{ nm}/\text{RIU}$ 和 $0.029714 \text{ nm}/\text{mm}$;光纤布喇格光栅透射峰对温度的灵敏度为 $0.00989 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,但对折射率、液位不灵敏,因此可利用敏感矩阵实现双参量同时测量.该传感器可广泛应用于化学、生物和制药等领域.

关键词:光纤传感器;马赫增德干涉仪;球形结构;光纤布喇格光栅;温度;折射率;液位

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)10-1006002-6

All-fiber Interferometric Sensors for Simultaneous Measurement of Dual Parameters

CAO Ye, ZHAO Chen, TONG Zheng-rong

(Tianjin key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A compact optical fiber sensor based on a Mach-Zehnder interferometer embedded in fiber Bragg grating was proposed and experimentally demonstrated. The Mach-Zehnder interferometer is realized by concatenating two spherical-shape structures separated by a middle section. The spherical-shape structures act as a mode splitter and a mode collector, respectively. The effects of different structure parameters of Mach-Zehnder interferometer were discussed. As a result, the resonant wavelength of the fiber Bragg grating and the interference dip of the Mach-Zehnder interferometer have the different sensitivities of temperature, refractive index and liquid level. Experiment results show that the sensitivities of interference dip of Mach-Zehnder interferometer to temperature, refractive and liquid level are $0.0724 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $87.65 \text{ nm}/\text{RIU}$ and $-0.029714 \text{ nm}/\text{mm}$, respectively, the resonant wavelength of the fiber Bragg grating has sensitivity of $0.00989 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ to temperature, while is insensitive to refractive index and liquid level. The simultaneous measurement of dual parameters can be realized by sensitive matrix. This kind of sensor will have wild applications in chemistry, biology and pharmacy.

Key words: Fiber sensor; Mach-Zehnder interferometer; Spherical-shape structure; Fiber Bragg Grating (FBG); Temperature; Refractive index; Liquid level

OCIS Codes: 060.2310; 060.2300; 060.2330; 060.2370

0 引言

在光传感等领域,全光纤传感器因为其抗电磁干

扰能力强、耐腐蚀、成本低、重量轻、测量准确度高等特点^[1-3]得到了广泛关注.其中马赫增德(Mach-Zehnder, MZ)干涉结构制作简单、成本低,且可以进行双参量同

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2013AA014200),国家自然科学基金应急管理项目(No. 11444001)和天津市自然科学基金(No. 14JCYBJC16500)资助

第一作者:曹晔(1976—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤通信技术. Email:cynever@163.com

通讯作者:赵晨(1990—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感器. Email:miura12@126.com.

收稿日期:2015-06-16; **录用日期:**2015-07-29

<http://www.photon.ac.cn>

时测量,解决了光传感领域中的交叉敏感问题,单模-多模-单模(Single mode-Multimode-Single mode, SMS)结构^[4-8]、偏芯结构^[9-11]、锥形结构^[12-15]、利用光纤光栅或对光栅进行特殊加工(如利用飞秒激光器刻槽^[16])等都可以构成MZ干涉结构. SMS结构利用纤芯模式的干涉导致其灵敏度较小,温度灵敏度一般只有10 pm/°C左右;偏芯结构和锥形结构虽然灵敏度较高,一般是普通SMS结构的数倍,但需要调节偏芯量和锥的宽度,制作复杂;利用光纤光栅制作的传感结构成本高且结构强度有待提高.

在生物、化学和制药等实际应用领域中,温度、折射率和液位都是重要的参量. 液位或折射率的变化往往伴随着温度的变化,因此,可双参量同时测量的干涉型全光纤传感器就得到了广泛研究. 2013年, Jinping Chen^[17]等提出了一种偏芯结构级联锥形结构的折射率传感器,其灵敏度可达10 377 nm/RIU,但是该结构制作较复杂. 2014年, Yanfang Lu^[18]等提出了一种长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)对级联光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的传感结构,测量温度和折射率的灵敏度分别为30.3 pm/°C和-21.07 nm/RIU. 2013年, Yu Zhao^[19]等将SMS结构中多模光纤的包层腐蚀掉,实现了对液位的传感,灵敏度为1.02 nm/mm,但腐蚀后机械强度下降. 2014年, Xinpu Zhang^[20]等提出了利用光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)来测量液位的传感结构,灵敏度为112.7 pm/RIU,但该传感器成本较高且不能进行双参量同时测量.

本文将两个球形结构构成MZ干涉结构,再级联FBG,制成一种新型的干涉型传感器. MZ干涉仪产生的干涉峰和FBG的透射峰对温度、折射率、液位的灵敏度各不相同,因此可通过敏感矩阵实现双参量同时测量.

1 实验原理

实验装置及传感结构如图1. 宽带光源(Broadband Light Source, BBS)发出的光从单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)入射,进入第一个球形结构后,纤芯中的一部分光进入包层激发起高阶包层模式,另一部分光继续在纤芯中传播. 纤芯和包层中的光经过第二个球形结构后,包层中的光耦合回纤芯,发生纤芯和包层模式之间的干涉,形成干涉谱,这一部分是MZ干涉结构. 光继续传播经过FBG后,满足布喇格波长的光被反射,其余的光透射. 透射光传输到光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzers, OSA)中,通过观察到的透射谱检测被测参量的变化.

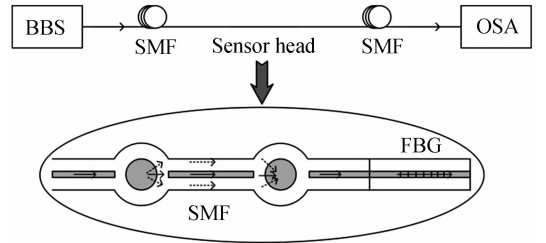


图1 实验装置及传感结构

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment and the sensor structure

由MZ干涉结构形成的透射谱强度可以表示为^[21]

$$I = I_{co} + I_{cl} + 2\sqrt{I_{co}I_{cl}} \cos(\varphi_0 + \Phi) \quad (1)$$

式中, I 为干涉信号的强度, I_{co} 为纤芯模式光强, I_{cl} 为包层模式光强, φ_0 为初始相位, Φ 为纤芯模式和包层模式之间的相位差.

由于不同模式之间的传播常数不同,在传播相同距离后,不同的模式会产生相位差. 纤芯模式和包层模式产生的相位差为

$$\Phi = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda} \quad (2)$$

式中, L 为两球形结构之间SMF的长度, λ 为真空中波长, $\Delta n_{eff} = n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl}$ 为纤芯和包层有效折射率之差.

当相位差满足 $\Phi = (2m+1)\pi$ (m 是正整数) 时发生干涉,结合式(2)可以得到干涉峰波长为

$$\lambda_{Dip} = \frac{2\Delta n_{eff}L}{2m+1} \quad (3)$$

纤芯模与包层模耦合形成的干涉谷间隔为

$$\Delta\lambda_{Dip} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff}L} \quad (4)$$

当外界参量发生变化时会引起式(3)中 L 和 Δn_{eff} 的变化,使得干涉峰发射漂移,干涉峰的相对漂移量可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_{MZI}}{\lambda_{MZI}} = \left(\frac{\xi_{co}n_{eff}^{co} - \xi_{cl}n_{eff}^{cl}}{n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl}} + \alpha \right) \Delta T + \left(\frac{1}{n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl}} - \frac{\partial n_{eff}^{cl}}{\partial n_{ex}} \right) \Delta n_{ex} \quad (5)$$

式中, $\alpha = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T}$ 为热膨胀系数, ξ_{co} 和 ξ_{cl} 为纤芯和包层的热光系数, n_{eff}^{co} 和 n_{eff}^{cl} 分别为纤芯和包层的有效折射率, ΔT 和 Δn_{ex} 分别为温度和外界折射率的变化. 由此可以看出MZ干涉峰与外界温度和折射率的变化呈线性关系.

由耦合模理论^[22]可知,FBG的中心波长满足

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (6)$$

式中, λ_B 是光纤布喇格光栅的中心波长, n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率, Λ 是光纤布喇格光栅周期.

λ_B 对温度变化灵敏,对折射率、液位变化不灵敏,其波长随温度的变化可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (7)$$

式中, $\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ 为热光系数, ΔT 为温度变化量. 由此可以看出 FBG 的透射峰与温度变化呈线性关系.

由式(5)和(7)可知, MZ 产生的干涉峰对温度、折射率和液位都敏感, FBG 产生的透射峰只对温度敏感, 且干涉峰和透射峰对温度的灵敏系数不同, 可以利用敏感矩阵实现双参量同时测量.

2 实验结果和分析

2.1 结构参量讨论

实验时, 首先用熔接机进行球形结构的制作. 熔接时放电时间为 1 300 ms, 放电强度为 200 bit. 光纤端面经过放电后形成球形结构且两球直径分别为 199.8 μm 和 195.6 μm , 两个球形结构级联形成 MZ 干涉结构.

由于不同的放电强度会形成不同直径的球形结构且放电强度越大直径越大. 利用熔接机分别将放电强度设置为 140 bit、160 bit、180 bit、200 bit (熔接机的最大放电强度), 并把它们分别命名为 Spherical-shape 1~4, 得到透射谱如图 2.

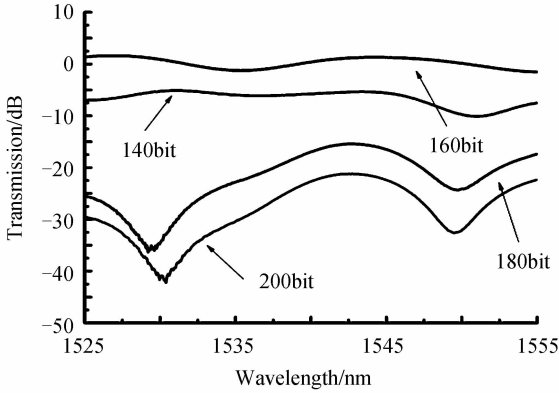


图 2 不同球形结构直径下传感结构透射谱
Fig. 2 Transmission spectrum of the sensor with different diameters

由图 2 可以看出, 放电强度越大, 得到球形结构的直径越大, 干涉谱的消光比越大, 观测也更加容易. 直径的增大使纤芯中更多的光进入包层, 激发起更多的包层模式并与纤芯模式发生干涉, 其灵敏度也随之提高, 如图 3、4.

图 5 为 SMF 不同长度(即干涉长度)时, 传感结构的透射谱. 由式(4)可看出球形结构之间 SMF 长度与波长间隔成反比, 长度越长, 波长间隔越小. 当球形结构之间 SMF 长度过短时, 干涉谷过少且消光比较小不利于测量; 当球形结构之间 SMF 长度过长时, 干涉谷过多且传感头过长不利于实际测量与应用.

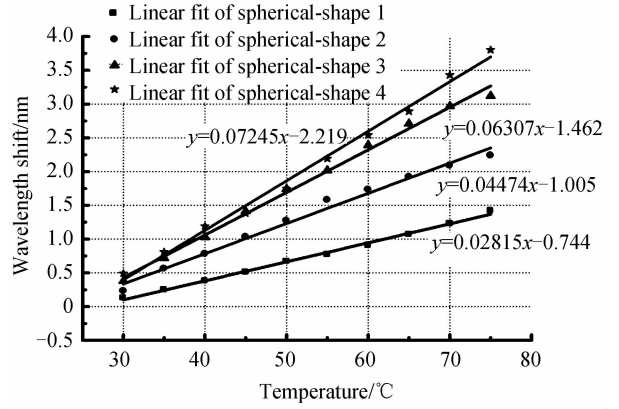


图 3 不同球形结构直径下温度响应特性曲线
Fig. 3 Temperature response characteristics curve of different diameters

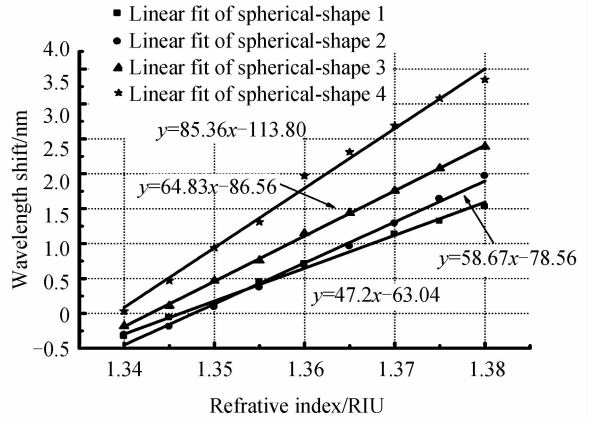


图 4 不同球形结构直径下折射率响应特性曲线
Fig. 4 Refractive Index response characteristics curve of different diameters

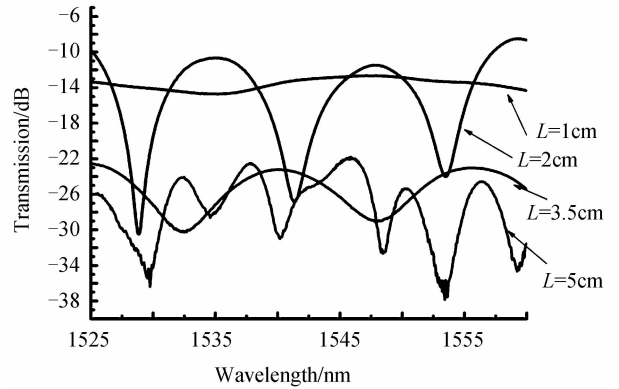


图 5 不同干涉长度的透射谱图
Fig. 5 Transmission spectrum of different interference length

根据第 1 节中的分析, 对式(5)进行微分可以得到

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \alpha + \frac{2L}{2m+1} \frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \partial n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{\partial T} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta n_{\text{ex}}} = \frac{2L}{2m+1} \frac{-\partial n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{\partial n_{\text{ex}}} \quad (9)$$

可以看出, 干涉长度 L 越长波长漂移量越大, 即灵敏度越高, 实验结果证实了该结论, 如图 6、7.

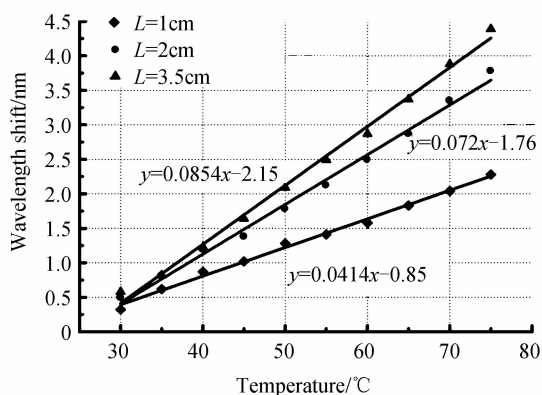


图 6 不同干涉长度下温度响应特性曲线

Fig. 6 Temperature response characteristics curve with different interference length

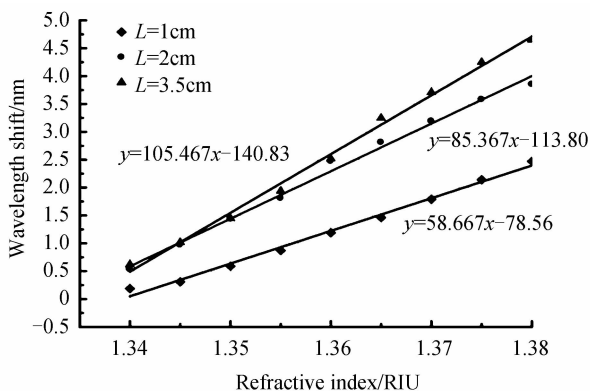


图 7 不同干涉长度下折射率响应特性曲线

Fig. 7 Refractive index response characteristics curve with different interference length

实验分析可得出在两球之间的单模光纤长度不变的情况下,放电强度越大,得到的球形结构直径越大,温度和折射率灵敏度也越高;在球形结构直径一定的情况下,两球之间的单模光纤长度越长,温度和折射率灵敏度越高。

理论和实验分析可知增加干涉长度可提高灵敏度.但是为了提高灵敏度而一味地增加干涉长度,会降低传感结构的实验可操作性且增加光谱测量的难度。

实验选取放电强度为 200 bit,制作球形结构且两球形结构之间的干涉长度 L 为 2 cm.

利用球形结构级联 FBG 的传感结构进行温度、折射率和液位实验.实验中所用的 SMF 纤芯直径为 $8.3 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$,所用的 FBG 在室温条件下,中心波长为 1536.13 nm ,所用宽带光源平坦范围为 $1525 \sim 1560 \text{ nm}$.传感结构在室温条件下处于自然状态放置,得到透射谱如图 8.

图 8 中, Dip_1 是干涉峰, Dip_{FBG} 是 FBG 的透射峰,实验中对 Dip_1 和 Dip_{FBG} 进行观测。

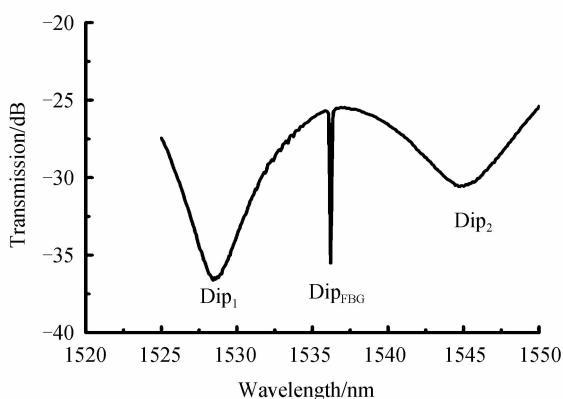
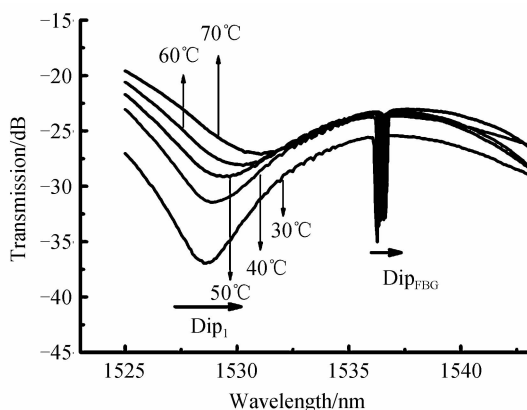


图 8 置于室温下传感器的透射谱图

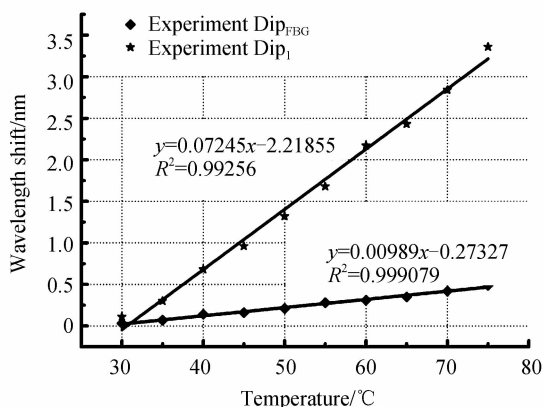
Fig. 8 Transmission spectra of the sensor at room temperature

2.2 温度特性实验

将传感结构自然状态放置在温度板上,对温度传感特性进行实验.首先将温度板温度设置为 25°C ,每升高 5°C 进行一次测量并记录波长变化,测量温度范围为 25°C 到 75°C .通过光谱仪可以观察到输出透射谱的变化,并绘制出温度响应特性曲线图,如图 9.由图 9



(a) Output spectrum from 30°C to 70°C



(b) Temperature response characteristics curve

图 9 输出光谱及温度特性曲线

Fig. 9 Output spectrum and temperature response characteristics curve

(a)可知, Dip_{P_1} 和 Dip_{FBG} 随着温度的升高发生了红移, 且 Dip_{P_1} 的漂移量较大, 从 1 528.34 nm 变化到 1 531.79 nm, Dip_{FBG} 从 1 536.13 nm 变化到 1 536.69 nm. 由图 9(b)可以看出 Dip_{P_1} 的温度灵敏度为 0.072 45 nm/°C, Dip_{FBG} 的温度灵敏度为 0.009 89 nm/°C.

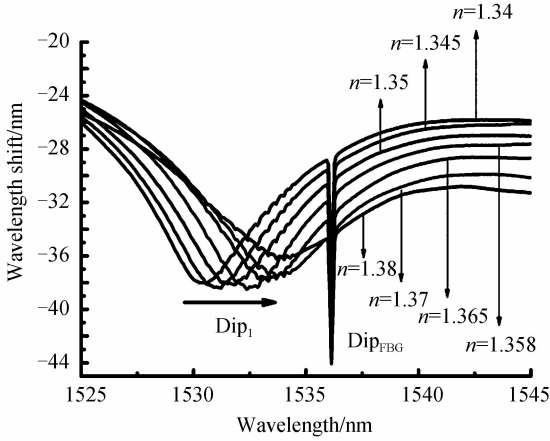
2.3 折射率特性实验

当温度保持在室温 25°C 时, 将传感器置于不同浓度的 NaCl 溶液中, 对折射率传感特性进行实验.

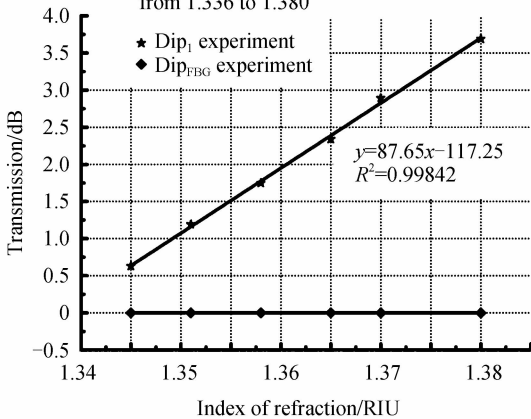
实验配制了不同浓度的 NaCl 溶液, 其所对应的折射率数值可由阿贝折射仪读出, 折射率变化范围从 1.336 到 1.380, 得到光谱漂移图及折射率响应特性曲线, 如图 10. 由图 10(a)可见, Dip_{FBG} 对折射率不敏感, 其透射波长保持不变, Dip_{P_1} 随着环境折射率的增大发生了红移, 从 1 530.6 nm 漂移到 1 534.09 nm. 由图 10(b)可知, Dip_{P_1} 折射率灵敏度为 87.65 nm/RIU.

个球形结构处为起始液位, 使用注射器对液位进行微调.

液位测量范围为 0~25 mm, 每隔 2.5 mm 进行一次测量并记录其波长变化, 得到透射谱漂移图及折射率响应特性曲线, 如图 11. 由图 11(a)可见, Dip_{FBG} 对液位不敏感, 其位置保持不变, Dip_{P_1} 随着液位的升高发生蓝移, 从 1 529.27 nm 漂移到 1 528.26 nm. 由图 11(b)可知, Dip_{P_1} 折射率灵敏度为 -0.029 714 nm/mm.



(a) Output spectrum when the refractive index from 1.336 to 1.380



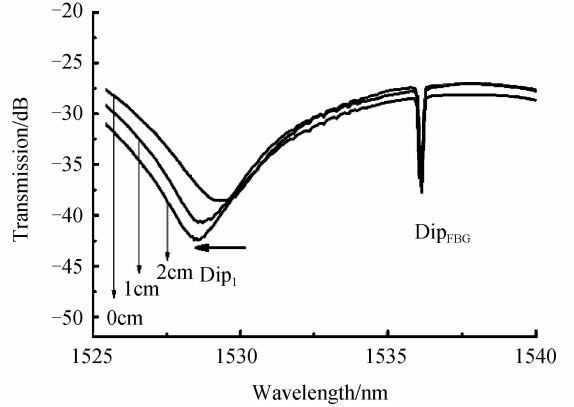
(b) Refractive index response characteristics curve

图 10 输出光谱及折射率特性曲线

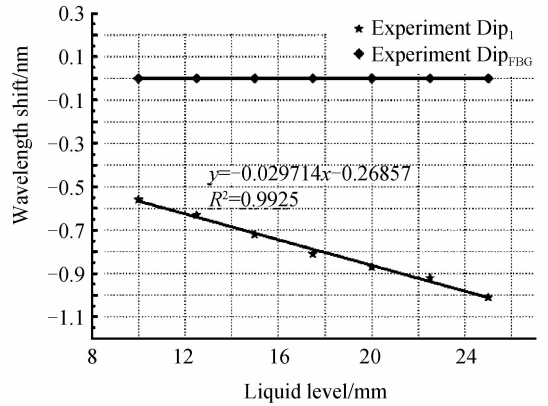
Fig. 10 Output spectrum and refractive index response characteristics curve

2.4 液位特性实验

将整个传感结构垂直固定在容器中, 输入端和输出端的 SMF 足够长, 保证传感结构没有产生弯曲或拉伸以提高实验的准确性. 实验在室温下进行, 记录第一



(a) Output spectrum when the liquid level from 0 to 25mm



(b) Liquid level response characteristics curve

图 11 输出光谱及液位特性曲线

Fig. 11 Output spectrum and Temperature response characteristics curve

2.5 实验结果分析

由实验结果可以看出, Dip_{P_1} 对温度、折射率、液位都灵敏, Dip_{FBG} 对温度灵敏. 可以利用敏感矩阵得出波长漂移量和温度、折射率之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_{FBG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{n1} \\ K_{TFBG} & K_{nFBG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $\begin{bmatrix} K_{T1} & K_{n1} \\ K_{TFBG} & K_{nFBG} \end{bmatrix}$ 是敏感矩阵, $\Delta\lambda_1$ 是 Dip_{P_1} 的漂移量, $\Delta\lambda_{FBG}$ 为 Dip_{FBG} 的漂移量, K_{T1} 是 Dip_{P_1} 的温度灵敏系数, K_{TFBG} 为 Dip_{FBG} 的温度灵敏系数, K_{n1} 是 Dip_{P_1} 的折射率灵敏系数, K_{nFBG} 为 Dip_{FBG} 的折射率灵敏系数, ΔT 和 Δn 分别表示外界环境的温度和折射率的变化.

式(10)变形后可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{n\text{FBG}} & -K_{n1} \\ -K_{T\text{FBG}} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $D = K_{T1} K_{n\text{FBG}} - K_{T\text{FBG}} K_{n1}$.

将实验中测得的 Dip_{P1} 和 Dip_{FBG} 的温度和折射率灵敏度系数代入式(11)可以得到波长变化量与温度、折射率改变量的关系

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{-0.8669} \begin{bmatrix} 0 & -87.65 \\ -0.00989 & 0.07245 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

因此,当外界环境的温度和折射率同时变化时,通过测量 Dip_{P1} 和 Dip_{FBG} 的变化量并代入式(12)即可计算出相应的温度与折射率的变化值,实现温度与折射率的同时测量。

同理,该传感结构也能实现温度和液位的同时测量,其波长变化量与温度、液位改变量的关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta L \end{bmatrix} = \frac{1}{0.000294} \begin{bmatrix} 0 & 0.029714 \\ -0.00989 & 0.07245 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3 结论

本文设计并制作了一种基于球形结构级联 FBG 的全光纤传感器,由两个球形结构组成的 MZ 干涉结构级联 FBG 构成传感头. 对结构参量和实验操作性进行讨论后得到最佳的结构参量,并利用此传感结构对温度、折射率、液位进行了实验测量. 实验表明 MZ 干涉结构产生的干涉峰对温度、折射率、液位都敏感,灵敏度分别为 $0.07245 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, $87.65 \text{ nm}/\text{RIU}$, $-0.029714 \text{ nm}/\text{mm}$. FBG 产生的透射峰对温度敏感,灵敏度为 $0.00989 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 对折射率、液位不灵敏. 此传感结构能够实现双参量同时测量且灵敏度高,在生物、化学、制药等领域都有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] BAI Zhi-yong, ZHANG Wei-gang, GAO She-cheng, *et al.* Compact long period fiber grating based on periodic micro-core-offset[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(21): 2111-2114.
- [2] LV An-qiang, LI Yong-mei, LI Jing, *et al.* Simultaneous calibration method for strain and temperature of distributed sensing optical fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1206002.
吕安强,李永倩,李静,等. 分布式传感光纤应变和温度同时标定方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(12): 1206002.
- [3] JIANG Qi, GAO Fang-fang. Simulation and experimental research of a novel flow sensor based on fiber bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 1206002.
蒋奇,高芳芳. 一种新型光纤 Bragg 光栅流量传感器的仿真与实验研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0228001.
- [4] SHI J, XIAO S, BI M. In-series single mode thin-core diameter fibers for simultaneous temperature and strain measurement[J]. *Electronics Letters*, 2012, **48**(2): 357-358.
- [5] WO Jiang-hai, SUN Qi-zhen, LIU Hai, *et al.* Sensitivity-

enhanced fiber optic temperature sensor with strain response suppression[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(4): 289-292.

- [6] GONG Yuan, ZHAO Tian, RAO Yun-jiang, *et al.* All-fiber curvature sensor based on multimode interference[J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(11): 679-681.
- [7] NGUYEN L, HWANG D, MOON S, *et al.* High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(15): 11369-11375.
- [8] ANTONIO-LOPEZ E, SANCHEZ-MONDRAGON J, LIKAMWA P, *et al.* Fiber-optic sensor for liquid level measurement[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3425-3427.
- [9] CHEN Jin-ping, ZHOU Jun, YUAN Xiao-cong. M-Z Interferometer constructed by two S-bend fibers for displacement and force measurements[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(8): 837-840.
- [10] CHEN Jin-ping, ZHOU Jun, JIA Zhen-hong. High-sensitivity displacement sensor based on a bent fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(23): 2354-2357.
- [11] CAO Zhi-gang, JI Xiao-chun, WANG Rui, *et al.* Compact fiber sensor with high spatial resolution for simultaneous strain and temperature measurement[J]. *Sensors Journal*, 2013, **13**(5): 1447-1451.
- [12] TAN Yan-zhen, SUN Li-peng, JIN Long, *et al.* Temperature-insensitive humidity sensor based on a silica fiber taper interferometer[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(22): 2201-2204.
- [13] WU Di, ZHU Tao, KIN Seng-chiang, *et al.* All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(5): 805-810.
- [14] TIAN Zhao-bing, YAM S, BARNES J, *et al.* Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers[J]. *Photonics Technology Letters*, 2009, **20**(8): 626-628.
- [15] MONZON D, MARTINEZ A, TORRES I, *et al.* Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(22): 4380-4382.
- [16] LIAO C R, WANG Ying, WANG D N, *et al.* Fiber In-line Mach-Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous refractive index and temperature measurement[J]. *Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(22): 1686-1688.
- [17] CHEN Jin-ping, ZHOU Jun, ZHANG Qi, *et al.* All-fiber modal interferometer based on a joint-taper-joint fiber structure for refractive index sensing with high sensitivity[J]. *Sensors Journal*, 2013, **13**(7): 2780-2785.
- [18] LU Yan-fang, SHEN Chang-yu, ZHONG Chuan, *et al.* Refractive index and temperature sensor based on Double-pass M-Z interferometer with a FBG[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(11): 1124-1127.
- [19] ZHAO Yu, JIN Yong-xing, WANG Jian-feng, *et al.* Detection of liquid-level variation using a SMS fiber structure[J]. *Optik*, 2013, **124**(18): 3771-3773.
- [20] ZHANG Xin-pu, PENG Wei, LIU Zi-geng, *et al.* Fiber optic liquid level sensor based on integration of lever principle and optical interferometry[J]. *Photonics Journal*, 2014, **6**(2): 1-4.
- [21] 李灿. 基于模间干涉的光纤 Mach-Zehnder 干涉型传感器的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2011: 23-24.
- [22] HILL K, MELTZ G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**: 1263-1276.