

FBG级联MZI的温度和酒精溶液浓度传感特性研究*

李 达, 何 巍, 娄小平, 董明利, 祝连庆

(北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 北京 100016)

摘要:为了测量白酒蒸馏过程中的温度和酒精溶度,制作了一种基于马赫曾德仪(MZI)与光纤布拉格光栅(FBG)级联的可同时测量温度和酒精溶液浓度的光纤传感器。FBG是利用飞秒激光逐线刻写的方式在单模光纤(SMF)中制作的周期为 $2.2\ \mu\text{m}$,布拉格波长为 $1\ 591.21\ \text{nm}$,透射谱深度可达 $23\ \text{dB}$ 的4阶光纤布拉格光栅;MZI是将细芯光纤和SMF采用纤芯错位和锥腰扩大熔接技术制作的腔长为 $8.7\ \text{mm}$,对比度为 $28.5\ \text{dB}$ 的透射式光纤干涉传感器。基于多光束干涉理论对传感器的温度和酒精溶液浓度传感特性进行分析,利用MZI干涉波谷与FBG透射峰的灵敏度差异,结合灵敏度系数矩阵实现对温度和酒精溶液浓度的同时测量。实验中,传感器的酒精溶液浓度和温度灵敏度分别可达 $-41.37\ \text{pm}/\%$ 和 $58.96\ \text{pm}/\text{C}$ 。该传感结构在白酒酿造产业有潜在的应用前景。

关键词: 光纤传感器;飞秒激光;光纤布拉格光栅;马赫曾德干涉仪;酒精溶液浓度

中图分类号: TN253 TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Simultaneous measurement of temperature and alcohol solution concentration based on the cascade of FBG and MZI

Li Da, He Wei, Lou Xiaoping, Dong Mingli, Zhu Lianqing

(Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments,
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: To detect the temperature and alcohol concentration during the liquor distillation, a dual-parameter optical sensor based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) and fiber Bragg grating (FBG) cascade structure is fabricated. The sensor is formed by a 4-order FBG which is fabricated by the femtosecond laser with line-by-line method in single mode fiber (SMF). The transmitted MZI is based on core-offset and large overlap splicing method between thin core fiber and SMF. The period of the proposed FBG is $2.2\ \mu\text{m}$. The Bragg wavelength is $1\ 591.21\ \text{nm}$. The depth of the transmission spectrum is $23\ \text{dB}$. For MZI, the length of thin core fiber is $8.7\ \text{mm}$ and the interference contrast fringe is $28.5\ \text{dB}$. The temperature and alcohol solution concentration features of the sensor are analyzed by beam interference theory. FBG and MZI have different sensitivities to temperature and alcohol solution concentration. The sensitivity matrix is constructed and the temperature and alcohol solution concentration can be measured simultaneously. In the experiments, the sensitivities of concentration of alcohol solution and temperature can reach up to $-41.37\ \text{pm}/\%$ and $58.96\ \text{pm}/\text{C}$. Therefore, the proposed sensing structure has the potential application prospect in the liquor manufacturing industry.

Keywords: fiber optics sensors; femtosecond laser; fiber Bragg grating; Mach-Zehnder interferometer; concentration of alcohol solution

0 引 言

白酒蒸馏是中国白酒酿造中的一项独特技术,蒸馏

过程中接酒温度直接关系到基酒的质量,高温接酒产生较大的酒损,低温接酒则会造成水资源浪费。目前对蒸馏过程温度测量方法主要基于铂热电阻和Pt-100等电传感器;酒精浓度也是白酒蒸馏过程的重要指标,而对酒精

溶液浓度的在线检测方法主要有超声波法^[1]、电容法^[2]等。上述对白酒蒸馏过程温度和酒精浓度的监测基本都是基于电传感器,且无法实现单传感器对温度和酒精浓度的同时测量。光纤传感器由于具有质量轻、体积小、抗腐蚀、抗电磁干扰和灵敏度高优点,已经广泛应用于物理、化学和生物传感领域^[3-8]。典型的光纤传感器如光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)^[9]、长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPFG)^[10]、法布里珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)^[11]、马赫曾德干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[12]等在测量折射率、温度、应变等参数方面得到广泛应用。全光纤马赫泽德干涉仪由于其制作简单、灵敏度高和体积小等优点广泛应用于溶液浓度、温度和折射率等参数的测量。主要是基于LPFG级联^[13]、锥腰扩大^[14]、错位熔接^[15]、花生结构^[16]、锥形结构^[17]、光子晶体光纤^[18]、多芯光纤^[19]、细芯光纤^[20]等结构实现MZI的制作。2015年王栋远等人^[21]提出了一种基于FBG和MZI相结合的同时测量曲率和温度的光纤传感器,其温度灵敏度为12.17 pm/°C;2016年Tong ZH. R.等人^[22]利用将拉锥处理的单模光纤(single mode fiber, SMF)与多模光纤结合的方式制作了可实现对温度和液位双参数同时测量的MZI;2017年马启飞等人^[23]通过将两个球形结构级联锥形结构的方式制作了可实现温度和折射率同时测量的MZI。而且目前对可实现温度和酒精浓度同时测量的光纤传感器研究相对较少,因此研究可用于白酒蒸馏过程同时测量温度和酒精溶液浓度的光纤传感器具有重要意义。

本文制作了一种基于FBG和MZI级联的光纤传感器。其中FBG是利用飞秒激光逐线刻写的方式在SMF中制作周期为2.2 μm,布拉格波长为1 591.21 nm,透射谱深度可达23 dB的4阶光纤布拉格光栅;MZI是将细芯光纤和单模光纤采用纤芯错位和锥腰扩大熔接技术制作的腔长为8.7 mm,对比度为24.98 dB的透射式光纤干涉传感器。利用MZI干涉波谷与FBG透射峰的灵敏度差异,结合灵敏度系数矩阵实现对温度和酒精溶液浓度的同时测量。

1 传感原理

传感器结构示意图如图1所示。该传感器是由一个基于飞秒激光逐线刻写法制作的FBG和一个基于纤芯错位结合锥腰扩大熔接技术制作的MZI构成。当FBG的透射光经过第1个错位熔接点后,一部分光在HI1060的纤芯中传输,一部分光被激发到HI1060的包层中传输。在包层中传输的光会在第2个错位熔接点耦合到SMF的纤芯中,由于HI1060的纤芯模和包层模的相位差异,对应透射光谱中不同的峰值,形成干涉光谱。

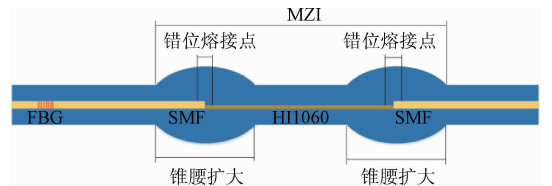


图1 FBG级联MZI结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of FBG and MZI cascade

MZI的干涉光谱图是HI1060包层模和纤芯模干涉叠加的结果,其中两种模式的相位可表示为:

$$\varphi = 2\pi\Delta n_{\text{eff}}L/\lambda \quad (1)$$

式中: λ 为传输光的波长, L 是HI1060的长度, Δn_{eff} 是包层模和纤芯模的相对折射率差。当相位差满足:

$$\varphi = (2m + 1)\pi \quad (2)$$

干涉强度取最小值,其中 m 取整数,干涉波谷对应的波长可表示为:

$$\lambda_m = 2\Delta n_{\text{eff}}L/(2m + 1) \quad (3)$$

当外界温度发生变化时,光纤热光效应和热膨胀效应会导致HI1060的折射率和长度发生改变:

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_m} = \left(\alpha + \frac{\xi_1 n_1 - \xi_2 n_2}{n_1 - n_2} \right) \Delta T \quad (4)$$

式中: ξ_1 和 ξ_2 分别为纤芯和包层的弹光系数, n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率。

当外部折射率发生改变时,干涉波谷的波长变化量可表示为:

$$\Delta\lambda_m = \frac{2\Delta nL}{2m + 1} \quad (5)$$

由于酒精溶液浓度与折射率之间为线性关系,因此干涉波谷与酒精溶液浓度之间的关系可表示为:

$$\Delta\lambda_m = \frac{2k\Delta C L}{2m + 1} \quad (6)$$

式中: k 为酒精溶液浓度与折射率的转换系数, Δn 是 Δn_{eff} 随外部折射率的改变量。

布拉格光纤光栅的光栅方程可表示为:

$$m\lambda_{\text{FBG}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (7)$$

式中: λ_{FBG} 为布拉格波长, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。当外界环境的温度发生变化时,由于热光效应和热膨胀效应的存在,布拉格波长会发生变化:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}}}{\lambda_{\text{FBG}}} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (8)$$

式中: α 和 ξ 分别是光纤的热膨胀系数和热光系数。

2 传感器制备

飞秒激光制光纤F-P传感器的加工系统如图2所示,该系统主要由飞秒激光器、三维位移平台、聚焦物镜、

宽带光源(broad band source, BBS)、光谱分析仪和控制电脑等组成。其中,飞秒激光器是中心波长 800 nm、脉冲宽度 35 fs、重复频率 1 kHz 的钛蓝宝石飞秒激光器;光谱分析仪为日本 YOKOGAWA 公司的 AQ6375 光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA),工作波长范围 1 200 ~ 2 400 nm。激光器出射的红外激光首先经过半波片、偏振片、衰减片和高反镜,然后通过 45 倍的显微物镜将光斑聚焦在由光纤夹具固定的光纤中。在加工过程中利用光谱分析仪实时观测 FBG 的透射光谱,通过软件控制三维运动平台的移动和 Shutter 的闭合,完成 FBG 的制作。

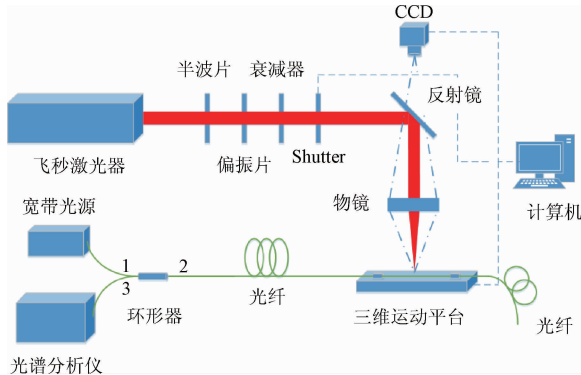


图2 飞秒激光制作 FBG 系统

Fig. 2 Fabrication of FBG system with femtosecond laser

将去涂覆层的单模光纤固定在光纤夹具上,为了保证激光光斑能够聚焦到纤芯中,采用放大倍数为 45 倍、数值孔径为 0.75 的 Zeiss 显微物镜,并在光纤夹具上方和下方分别安装一个 LED 照明设备,保证可以通过聚焦物镜上方的 CCD 观测光斑在光纤中的聚焦位置和光纤的加工形貌。实验中设置出射激光的单脉冲能量为 $1.6 \mu\text{J}$,飞秒激光的加工速度为 $80 \mu\text{m}/\text{s}$,刻线长度为 $20 \mu\text{m}$,光栅周期为 $2.2 \mu\text{m}$ 。图 3(a)所示为飞秒激光逐线写入法制作的 FBG 显微图像,图 3(b)所示为飞秒激

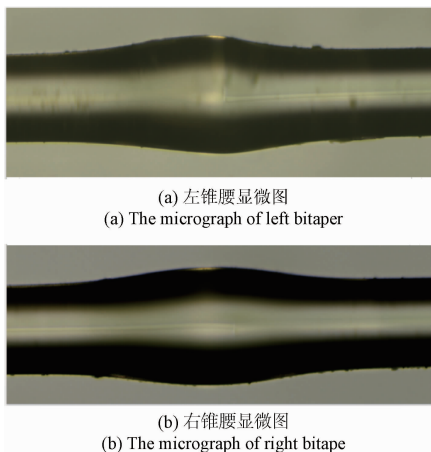


图4 纤芯错位结合锥腰扩大熔接技术制作 MZI

Fig. 4 The MZI based on core-offset and large overlap splicing method

光制作的 FBG 的透射光谱图。从图中可以看出该 FBG 的布拉格波长为 $1\,591.21 \text{ nm}$,透射谱深度可达 23 dB。

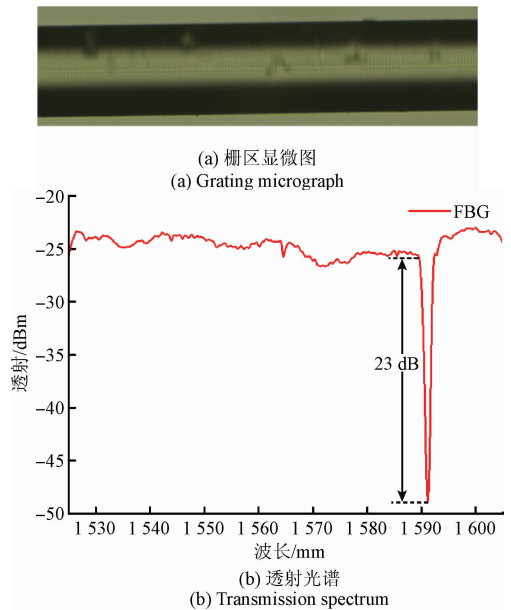
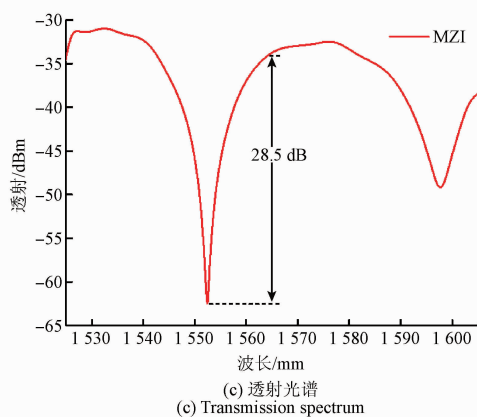


图3 飞秒激光逐线法制作 FBG

Fig. 3 Fabrication of femtosecond laser line by line method FBG

实验中,设计的 MZI 是利用光纤熔接机(Fujikura FMS-80S)通过纤芯错位结合锥腰扩大熔接技术制作而成。其中,光纤熔接机的参数为纤芯对准方式为手动对芯,预熔时间为 180 ms,预熔功率为标准 + 20,放电时间为 3 000 ms,重叠量为 $150 \mu\text{m}$ 。手动设置纤芯的错位间距约 $3 \mu\text{m}$,HI1060 光纤的长度为 8.7 mm,完成 MZI 的制作。图 4(a)和(b)所示分别为左右两个纤芯错位熔接点的显微图。图 4(c)所示为制作的 MZI 的透射光谱图,在 $1\,525 \sim 1\,605 \text{ nm}$,MZI 的透射光谱中出现两个干涉波谷,特征波长为 $1\,552.75 \text{ nm}$ 的干涉波谷的对比度可达到 28.5 dB。



为了实现温度与酒精溶液浓度的同时测量,实验中
将制作的 FBG 与 MZI 通过级联的方式熔接在一起构成
新型传感结构,同时利用宽带光源和光谱分析仪观测其
透射光谱,其透射光谱图如图 5 所示,可以看出 MZI 与
FBG 级联后,MZI 的干涉波谷的对比度为 24.98 dB,FBG
的透射谱深度为 18.35 dB。

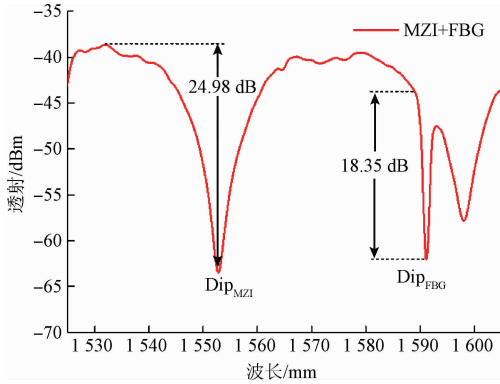


图 5 基于 FBG 和 MZI 级联制作的传感器的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectrum of sensors based on the cascade of FBG and MZI

3 传感实验与结果

如图 6 所示,传感器的温度和酒精溶液浓度传感实
验系统主要包括宽带光源、光谱分析仪、加热平台、折射
率测量装置和传感器等装置。

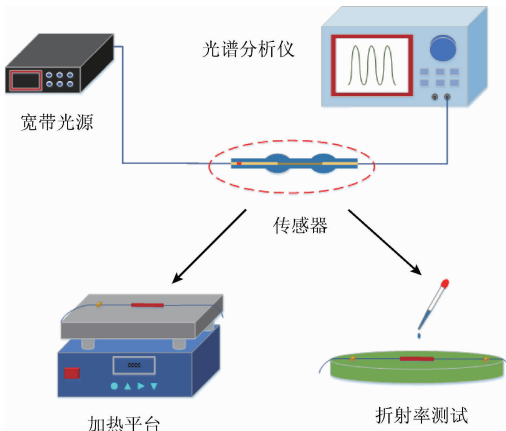


图 6 设计的测量酒精溶液浓度与温度传感特性的实验系统

Fig. 6 The experiment system for investigating the temperature and concentration and temperature of alcohol solution sensing properties of the sensor

为了测量传感器对酒精溶液的浓度特性,利用蒸馏
水和无水乙醇分别配置浓度为 0%、10%、20%、30%、

40% 和 50% 的酒精溶液,使用滴管将不同浓度的酒精溶
液分别滴到传感器上,同时利用光谱分析仪实时观测其
透射光谱的变化。图 7 所示为不同浓度的酒精溶液下传
感器的透射光谱。从图 7 中可以看出随着酒精浓度的增
加,Dip_{MZI}的波长向短波方向移动了 1.89 nm;Dip_{FBG}
对应的波长不发生移动。图 8 所示为 Dip_{MZI}和 Dip_{FBG}
的波长漂移量与酒精浓度的拟合曲线。其中 Dip_{MZI}的酒精浓度
灵敏度为 -41.37 pm/%,线性拟合度为 0.976 4。

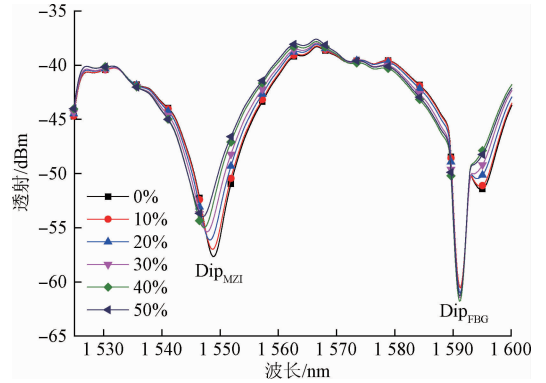


图 7 不同酒精溶液浓度下传感器的透射光谱

Fig. 7 Transmission spectrum of the sensor under different concentration of alcohol solution

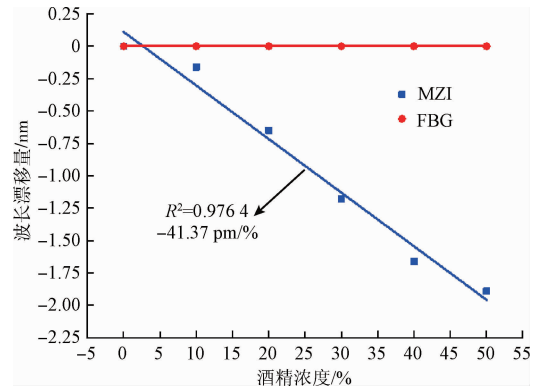


图 8 Dip_{MZI}和 Dip_{FBG}的波长漂移量与酒精浓度的拟合曲线

Fig. 8 The fitting curve of wavelength shift of Dip_{MZI} and Dip_{FBG} with alcohol concentration

为了进一步分析 MZI 的模间干涉原理,对传感器在
不同酒精溶液浓度下的透射光谱(见图 7)进行傅里叶变
换,得到不同酒精溶液浓度下传感器的空间频谱如图 9
所示。由于包层模的有效折射率小于纤芯模的有效折射
率,包层模的阶次越高,它的有效折射率就会越小。并且
在酒精溶液浓度传感过程中 MZI 的两个干涉臂长度相
等,根据式(9)可知,与波长的空间频率光谱有直接的关
系是纤芯模和包层模式之间的有效折射率差,因此光纤

不同包层模与纤芯模发生干涉时,对应频谱图中不同的主峰频率值。从图9可以看出频谱图中仅存在一个主峰,其幅值远大于其他峰,表明有多个高阶包层模与纤芯基模发生耦合,但是干涉光谱图主要由某个特定的高阶模和纤芯基模耦合形成的。当酒精溶液浓度发生改变时,频谱图中仅仅是主峰的幅值发生改变,而主峰对应的频率值均为0.024 9,说明传感器的干涉模式没有随着酒精溶液浓度的变化发生改变,干涉模式稳定。

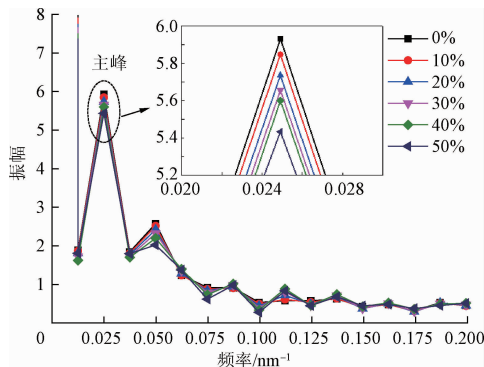


图9 不同酒精溶液浓度下传感器的空间频谱
Fig. 9 Spatial frequency spectrum of the sensor in different concentration of alcohol solution

空间频谱的峰值频率可表示为^[24]:

$$\xi = \frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{\lambda^2} \quad (9)$$

令 $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$, 根据式(9)计算出 $\Delta n_{\text{eff}} = 0.006\ 87$ 。实验中所用 HI1060 光纤的纤芯直径为 $3.4\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22。通过求解模式色散方程, 可得光纤中包层模式的阶次与和模式间有效折射率差的关系, 如表1所示。通过对比发现, LP_{012} 与 LP_{01} 的有效折射率差与实验结果相符, 因此 MZI 的干涉条纹是 LP_{012} 与 LP_{01} 干涉形成的。

表1 不同阶次包层模与纤芯模的有效折射率差

Table 1 The effective refractive index difference between different order cladding mode and core mode

包层模的阶次	有效折射率差 Δn_{eff}
2	0.000 13
3	0.000 35
4	0.000 68
5	0.001 10
6	0.001 63
7	0.002 26
8	0.002 98
9	0.003 81
10	0.004 74
11	0.005 76
12	0.006 89
13	0.008 12

为了探究制作的传感器的温度传感特性, 分别对 Dip_{MZI} 和 Dip_{FBG} 的变化规律进行探究。设计加热平台的温度变化范围为 $20 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$, 温度变化间隔为 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 利用光谱分析仪分别记录传感器在不同温度下的透射光谱。图10所示为传感器在不同温度的光谱, 从图中可以看出, 在 $20 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$, Dip_{MZI} 的特征波长向长波方向移动 $4.56\ \text{nm}$; Dip_{FBG} 向长波方向移动 $0.72\ \text{nm}$, 两个干涉波谷均发生红移。图11所示为 Dip_{MZI} 和 Dip_{FBG} 的波长漂移量与温度的拟合曲线。其中, Dip_{MZI} 和 Dip_{FBG} 的温度灵敏度分别为 58.96 和 $9.37\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, 拟合系数分别为 $0.996\ 4$ 和 $0.997\ 2$, Dip_{MZI} 和 Dip_{FBG} 波长漂移量与温度均有良好的线性关系。

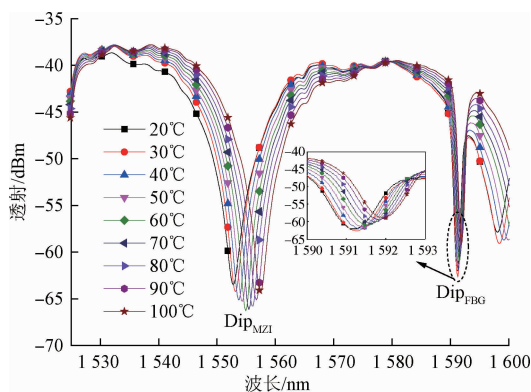


图10 不同温度下传感器的透射光谱
Fig. 10 The transmission spectrum of the sensor under different temperatures

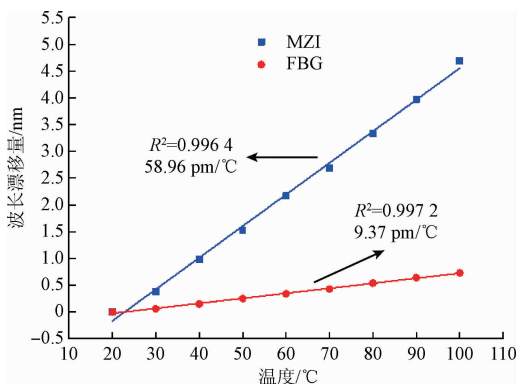


图11 Dip_{MZI} 和 Dip_{FBG} 的波长漂移量与温度的拟合曲线
Fig. 11 The fitting curve of wavelength shift of Dip_{MZI} and Dip_{FBG} with temperature

因此, 可以通过 Dip_{MZI} 和 Dip_{FBG} 在不同温度和酒精溶液浓度的漂移变化量, 结合灵敏度系数矩阵实现对温度和酒精溶液浓度的同时测量。灵敏度系数矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{MZI}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{T_{\text{MZI}}} & k_{C_{\text{MZI}}} \\ k_{T_{\text{FBG}}} & k_{C_{\text{FBG}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{MZI}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 分别为 DiP_{MZI} 和 DiP_{FBG} 对应特征波长的漂移量, $k_{T_{\text{MZI}}}$ 、 $k_{T_{\text{FBG}}}$ 和 $k_{C_{\text{MZI}}}$ 、 $k_{C_{\text{FBG}}}$ 分别为 DiP_{MZI} 和 DiP_{FBG} 的温度和酒精溶液浓度灵敏度, ΔT 和 ΔC 分别为 DiP_{MZI} 和 DiP_{FBG} 的温度和浓度的变化量。因此温度和酒精溶液浓度的变化量可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{T_{\text{MZI}}} & k_{C_{\text{MZI}}} \\ k_{T_{\text{FBG}}} & k_{C_{\text{FBG}}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{MZI}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(10)可知,通过分别测量 DiP_{MZI} 和 DiP_{FBG} 的波长漂移量就可以实现对外界温度和酒精浓度的同时测量。

将 DiP_{MZI} 和 DiP_{FBG} 的温度和溶液浓度响应灵敏度代入式(11)可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1067 \\ -0.0242 & 0.1521 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{MZI}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于目前对同时测量温度和酒精溶液浓度的传感器研究相对较少,为了对比本文制作的双参数传感器与以往传感器的差异,将酒精溶液浓度换算成折射率得到传感器的折射率灵敏度为 -125.37 nm/RIU 。不同双参数传感器的灵敏度参数对比如表 2 所示。通过对比可知,本文提出的传感结构与文献[25-32]相比具有更高的温度灵敏度,与文献[33]相比具有更高的折射率灵敏度。

表 2 不同双参数传感器灵敏度参数对比

Table 2 Comparisons of sensitivity parameters of different dual-parameter sensors

传感器结构	折射率灵敏度	温度灵敏度/ $(\mu\text{m} \cdot \text{C}^{-1})$	参考文献
球形级联锥结构 MZI	100.03 dB/RIU	54.6	文献[23]
锥腰扩大 MZI	270.52 nm/RIU	19.3	文献[25]
FBG 结合弯曲 SMF	165.93 nm/RIU	31.7	文献[26]
少模 FBG	4.816 nm/RIU	9.62	文献[27]
同轴 FPI	0.846 nm/RIU	2.48	文献[28]
LPFG 级联 S 型 Taper	311.48 nm/RIU	45.87	文献[29]
纤芯错位 MZI 级联 FBG	13.76 nm/RIU	46.3	文献[30]
FPI 级联 MZI	108 nm/RIU	27.5	文献[31]
FBG 级联液滴结构	157.89 nm/RIU	23.8	文献[32]
花生结构 MZI 级联 FBG	-26.96 nm/RIU	83.29	文献[33]
锥腰扩大结合错位 MZI 级联 FBG	-125.37 nm/RIU	58.98	本文 方法

4 结 论

利用马赫曾德干涉仪级联光纤布拉格光栅的方式制作可同时测量温度和酒精溶液浓度的光纤传感器。利用多光束干涉理论对设计传感器的温度和折射率传感特性进行理论分析。实验中,在酒精溶液浓度为 $0\% \sim 50\%$,MZI 干涉波谷的浓度灵敏度可达 $-41.37 \text{ pm}/\%$,FBG 对酒精浓度变化不敏感;在 $20 \sim 100^\circ\text{C}$ 温度范围内,MZI 和 FBG 的透射峰的温度灵敏度分别为 58.96 和 $9.37 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。因此,基于 MZI 级联 FBG 制作的光纤温度和酒精溶液浓度传感器具有无污染、速度快、可长距离传输、小型化、抗电磁干扰等特点,可用于白酒蒸馏过程温度和酒精浓度的在线监测。

参考文献

[1] 杨海麟,吕霞付,王龙刚,等.乙醇浓度在线测量超声

波传感器的研制[J].酿酒,2003,30(5):31-33.

YANG H Q, LV X F, WANG L G, et al. Studies on ultrasonic sensor of on-line ethanol measurement[J]. Liquor Making, 2003, 30(5):31-33.

[2] 雷志勇,王娇,王泽民.电容法的工业酒精浓度测量及其非线性修正[J].西安工业大学学报,2014(11):891-895.

LEI ZH Y, WANG J, WANG Z M. Concentration measurement of industrial alcohol based on capacitance and non-linear correction[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2014(11):891-895.

[3] 刘明尧,卢一帆,张志建,等.基于聚合物封装的光纤布拉格光栅压力传感器[J].仪器仪表学报,2016,37(10):2392-2398.

LIU M R, LU Y F, ZHANG ZH J, et al. FBG pressure sensor based on polymer packaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10):2392-2398.

[4] PALMA P D, NATALE D, CAMPOPIANO S, et al. A

- simple Fabry-Perot pressure sensor fabricated on fiber optic tip [C]. European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2016:991610.
- [5] 陈勍勍, 王峰, 张旭革, 等. POTDR 振动传感系统的数据处理与分析方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11):1671-1678.
- CHEN M M, WANG F, ZHANG X P, et al. Data processing and analysis method of POTDR vibration sensing system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11):1671-1678.
- [6] 杜延霞, 王春华, 张启文. 基于 Mueller 矩阵的糖溶液旋光度测量 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(7):165-168.
- DU Y X, WANG CH H, ZHANG Q W. Measurement of the optical rotation angle based on Mueller matrix[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7):165-168.
- [7] 李红, 祝连庆, 闫光, 等. 基于改性型 UDP 和 CIGI 的光纤光栅高速解调技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):129-135.
- LI H, ZHU L Q, YAN G, et al. FBG high speed demodulation technology based on improved UDP and CIGI[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):129-135.
- [8] 马丹, 葛俊锋, 叶林, 等. 光纤点式液位传感技术的研究现状[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9):92-95.
- MA D, GE J F, YE L, et al. Review on fiber optic point liquid-level sensors[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(9):92-95.
- [9] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12):1806-1812.
- JIANG D P, WU W. Fiber Bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12):1806-1812.
- [10] LIU S, WU J, LUO M, et al. Investigation of impact of photonic crystal fiber structure modified by femtosecond laser micromachining on long period gratings' sensing characteristics [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2016(77):79-84.
- [11] NI X Q, WANG M, GUO D M. Fiber in-line Fabry - Pérot interferometer for simultaneous measurement of reflective index and temperature [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(5):1-5.
- [12] 李本业, 王素梅, 王鹏, 等. 一种基于马赫-曾德干涉仪的全光纤传感器双参数测量技术 [J]. 光学技术, 2014, 40(1):3-6.
- LI B Y, WANG S M, WANG P, et al. All-fiber asymmetrical interferometeriv sensor for simultaneous dual-parameter measurements [J]. Optical Technique, 2014, 40(1):3-6.
- [13] LU Y, SHEN C, ZHONG C, et al. Refractive index and temperature sensor based on double-pass M-Z interferometer with an FBG [J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2014, 26(11):1124-1127.
- [14] 杨凯, 徐贲, 李裔, 等. 高灵敏度液封光纤马赫-曾德干涉仪温度传感器 [J]. 光电子·激光, 2014(7):1259-1264.
- YANG K, XU B, LI Y, et al. Highly sensitive temperature fiber sensor nased on liquid-sealed Mach-Zehnder interferometer [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014(7):1259-1264.
- [15] ZHAO Y, LI X G, CAI L. A highly sensitive Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor based on core-offset single mode fiber [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 223:119-124.
- [16] WU D, ZHU T, CHIANG K S, 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.
- [17] SHEN X, XU L, WANG S. High-sensitivity Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor based on two different ultra-abrupt tapers [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2015, 9449(2):94491X-94491X-6.
- [18] LI X G, ZHAO Y, CAI L, et al. Simultaneous measurement of RI and temperature with a FP and Mach-Zehnder composite interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17):1.
- [19] LI C, NING T, LI J, et al. Simultaneous measurement of refractive index, strain, and temperature based on a four-core fiber combined with a fiber Bragg grating [J]. Optics & Laser Technology, 2017(90):179-184.
- [20] SUN M, XU B, DONG X, et al. Optical fiber strain and temperature sensor based on an in-line Mach-Zehnder interferometer using thin-core fiber [J]. Optics Communications, 2012, 285(18):3721-3725.
- [21] 王栋远, 孙明明, 金永兴, 等. 同时测量温度和曲率的光纤传感器 [J]. 光子学报, 2015, 44(11):20-24.
- WANG D Y, SUN M M, JIN Y X, et al. Simultaneous measurement of curvature and temperature based on optical fiber sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(11):20-24.
- [22] TONG ZH R, LUAN P, CAO Y, et al. Dual-parameter optical fiber sensor based on concatenated down-taper and multimode fiber [J]. Optics Communications, 2016, 358:77-81.
- [23] 马启飞, 倪凯, 黄然. 同时测量温度和折射率的光纤传感器 [J]. 光电子·激光, 2017(2):123-127.

- MA Q F, NI K, HUANG R. Simultaneous temperature and refractive index measurement based on optical fiber sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2017(2): 123-127.
- [24] 赵娜, 傅海威, 邵敏, 等. 基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6):1722-1726.
- ZHAO N, FU H W, SHAO M, et al. Research on high sensitivity temperature sensor based on mach-zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1722-1726.
- [25] 卞继城, 郎婷婷, 孔文, 等. 腰椎放大细芯光纤传感器实现折射率/温度同时测量的研究[J]. *光电子·激光*, 2016(4):353-358.
- BIAN J CH, LANG T T, KONG W, et al. Thin-core single-mode fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on waist-enlarged tapers[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2016(4): 353-358.
- [26] LIU T, CHEN Y, HAN Q, et al. Sensor based on macrobent fiber Bragg grating structure for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4):791.
- [27] YANG H Z, ALI M M, ISLAM M R, et al. Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 228:62-68.
- [28] NI X Q, WANG M, GUO D M. Fiber in-line Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5):1-5.
- [29] LI J, ZHANG W, GAO S, 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.
- [30] YAO Q, MWNG H, WANG W, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2014, 209(1):73-77.
- [31] LI X G, ZHAO Y, CAI L, et al. Simultaneous measurement of RI and temperature based on a composite interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(17):1839-1842.
- [32] CHEN Y, HAN Q, LIU T, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a cascaded FBG/Droplet-like fiber structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11):6432-6436.
- [33] CAOY, LIU H, TONG Z, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a Mach-Zehnder interferometer cascaded with a fiber Bragg grating[J]. *Optics Communications*, 2015, 342(1): 180-183.

作者简介



李达, 2015 年于江南大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感和飞秒激光微加工。
E-mail:18811562698@163.com

Li Da received his B. Sc. degree from Jiangnan University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing and femtosecond laser micromachining.



祝连庆, 分别在 1984 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感与激光器、精密测量与系统。
E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from HeFei University of Technology in 1984 and 1989, respectively, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. Now he is a professor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber optic sensors and lasers, precision measurement and systems.