

基于双光栅级联结构的温度及浓度传感特性测试

张 雯^{1,2,3}, 刘小龙^{1,2,3}, 何 巍^{1,2,3}, 娄小平^{1,2,3}, 祝连庆^{1,2,3}

(1. 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; 2. 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192; 3. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘 要: 研究了长周期光纤光栅(LPFG)级联布拉格光纤光栅(FBG)结构的温度及浓度传感特性。利用飞秒激光直写制作 LPFG 并级联 FBG, 且 FBG 波谷位于 1 551.9 nm, LPFG 波谷位置为 1 560.5 nm。在 30~50 °C 温度变化范围内对传感器温度特性进行测试, 并在 25 °C 超净环境下对浓度为 3%~30% 的葡萄糖溶液进行敏感性测试。实验结果表明: 升温过程 FBG 中心波长发生红移, 灵敏度 26.36 pm/°C, 线性度 0.950 8; LPFG 中心波长发生蓝移, 灵敏度 -24.55 pm/°C, 线性度 0.914 2。降温过程 FBG 中心波长发生蓝移, 灵敏度 25.00 pm/°C, 线性度 0.945 8; LPFG 中心波长发生红移, 灵敏度为 -21.82 pm/°C, 线性度 0.921 2。FBG 对浓度变化不敏感, 当浓度由 3% 增至 30% 时, LPFG 中心波长发生蓝移, 灵敏度 196.36 pm, 线性度 0.956 5。结果表明该光纤传感器灵敏度高, 线性度好, 可以同时动态实现温度和浓度的测量。

关键词: LPFG; 飞秒激光加工; FBG; 双参数测量; 温度传感特性; 浓度传感特性

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0917006

Measurement of temperature and concentration sensing characteristics based on dual-grating cascade structure

Zhang Wen^{1,2,3}, Liu Xiaolong^{1,2,3}, He Wei^{1,2,3}, Lou Xiaoping^{1,2,3}, Zhu Lianqing^{1,2,3}

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 2. Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China; 3. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: A dual-grating cascade structure based on long period fiber grating (LPFG) cascaded with fiber Bragg grating (FBG) for temperature and concentration measurement has been proposed. The proposed fiber sensor was cascaded by LPFG micromachined by the femtosecond laser and FBG, and the transmission spectrum has two valleys, namely FBG valley at 1 551.9 nm and LPFG valley at 1 560.5 nm. The temperature and concentration sensing characteristics of the proposed sensor were measured at 30–50 °C and 3%–30%, respectively. The experimental results show that when the temperature rises, the FBG

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT1212); 北京市教委 2015 年度创新能力提升计划(TJSHG201510772016); 光电信息与仪器北京市工程研究中心开放课题(GD2016008)

作者简介: 张雯(1988-), 女, 讲师, 博士, 主要从事 MEMS 器件及光纤传感系统相关方面的研究。Email: baswen@163.com

通讯作者: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤传感与激光器、精密测量与系统方面的研究。

Email: zhulianqing@sina.com

shows red shift with increasing wavelength, the sensitivity is 26.36 pm/°C, and the linearity is 0.950 8; on the contrast, the LPFG shows blue shift with decreasing wavelength, the sensitivity is -24.55 pm/°C, and the linearity is 0.914 2. When the temperature falls, the FBG shows blue shift with decreasing wavelength, the sensitivity is 25.00 pm/°C, and the linearity is 0.945 8; the LPFG shows red shift with increasing wavelength, the sensitivity is -21.82 pm/°C, and the linearity is 0.921 2. The FBG is not sensitive to the concentration variation. When the glucose concentration rises from 3% to 30%, the LPFG shows blue shift with decreasing wavelength, the sensitivity is 196.36 pm, and the linearity is 0.956 5. The proposed sensor has high sensitivity and good linearity for dual-parameter measurements.

Key words: long period fiber grating; femtosecond laser micromachining; fiber Bragg grating; dual-parameter measurements; temperature sensing characterization; concentration sensing characterization

0 引言

光纤传感技术是20世纪70年代发展起来的新型传感技术,通过调制光纤中传输光的强度、相位、波长、偏振态并对这些变化进行监测,实现对温度、应变、压力、声振动、角速度等多种参量的测量^[1-2]。由于光纤传感器具有体积小、重量轻、测量灵敏度高、复用能力强、抗电磁干扰、易于嵌入材料内部等优点^[3-4],近年来受到广泛关注,成为传感技术研究领域的热点之一^[5-6]。与传统的机电或电子传感器相比,光纤传感器更符合现代生物传感技术的需求,具有重要的学术价值和应用前景^[7-8]。

然而,目前针对传感器的研究更多的是单一变量的传感测量,而实际环境并不是简单的单一变量,交叉敏感问题无处不在。近年来,对于双参数测量传感器的研究也受到研究者的广泛青睐^[9-10]。2012年葡萄牙C. Gouveia等人利用高双折射光纤制作了能够同时传感折射率和温度的光栅腔传感器,通过分别测量干涉条纹对比度和波长漂移变化来解调折射率和温度的变化,温度灵敏度达到10.52 pm/°C和10.13 pm/°C^[11]。2014年Jianying Yuan等人利用长周期光纤光栅与Sagnac干涉环串联,实现了温度及折射率的同时测量,折射率灵敏度为16.864 nm/RIU,温度灵敏度为1.533 nm/°C^[12]。2015年,简水生课题组提出了一种基于耦合型双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力双参数解耦测量的全光纤型传感系统,可以分别实现4.304 8 με及0.456 2 °C的应力与温度传感测量分辨率^[13]。

2016年,Shengnan Wu等人通过FBG连接侧面开口的光纤F-P腔,并应用于气体压力和温度的测量,气体压力灵敏度分别为4.063 pm/kPa和4.071 pm/kPa,温度交叉敏感度为214 Pa/°C和204 Pa/°C^[14]。2017年,天津大学徐德刚设计了一种基于级联保偏光纤和长周期光纤光栅的Sagnac环温度和环境折射率双参量传感器,其温度灵敏度1.2 nm/°C,环境折射率灵敏度为15 nm/RIU^[15]。

葡萄糖(Glucose)是自然界分布最广且最为重要的一种单糖,它是一种多羟基醛,在生物学领域具有重要地位,是活细胞能量来源和新陈代谢中间产物,即生物主要供能物质^[16]。浓度是描述溶液特性的重要参数,对浓度的测量和控制工业生产 and 科学研究等各个领域都有着极为普遍的应用^[17]。文中以Corning公司SMF-28单模光纤为研究对象,以葡萄糖溶液的浓度和活性温度范围为测量对象,利用飞秒激光逐线写入方式加工LPFG并与FBG级联,制成温度和浓度双参数光纤传感器。分别搭建温度和应变测试系统,对该传感器的双参数测量进行数据分析与误差处理。

1 光纤传感器工作原理

文中使用Corning公司SMF-28光纤进行飞秒激光刻写制作LPFG,并与FBG级联组成双参数光纤传感器。当环境参数发生变化时,光栅周期、栅距等会发生改变,级联结构的透射谱波长也将随之发生漂移。

设外界温度为 T ,低耦合强度的LPFG光谱干

涉峰谐振波长的温度灵敏度可表示为：

$$\frac{d\lambda_L}{dT} = \frac{d\lambda_L}{\Delta m} \left(\frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial T} + \Delta n_{eff} \alpha_T \right) \quad (1)$$

式中： λ_L 为干涉条纹波长； Δm 为光纤差分有效群折射率； $\Delta n_{eff} = n_{co} - \Delta n_{cl}^{(p)}$ 为光纤纤芯与包层的有效折射率之差，是光纤的热膨胀系数。

FBG 反射波长的温度灵敏度为：

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} (\alpha_T + \zeta_T) T \quad (2)$$

式中： λ_B 为 FBG 的干涉条纹波长； ζ_T 为光纤的热光系数。

由公式(1)和公式(2)可知，相同温度变化条件下，LPFG 与 FBG 对于温度变化的灵敏度不同，二者的波长漂移量也不同，不存在串扰。

根据耦合模理论，LPFG 纤芯传输的基模能量可耦合到同向传输的包层模中，而 FBG 的光场主要是沿纤芯传输。当外界折射率变化时，LPFG 的包层模式有效折射率也会发生改变，引起谐振波长的移动，实现溶液浓度测量，而 FBG 无法直接感知外界折射率的变化。故在进行浓度测量时，级联结构的两支光栅之间不存在串扰。

设 LPFG 包层折射率为 n_2 ，当外界环境折射率从 n_3 变为 n'_3 时，LPFG 谐振波长的漂移量可表示为：

$$\Delta \lambda_L \cong \frac{U_\infty^2 \lambda_L^3 \Lambda}{8\pi^3 n_2 r_2^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3'^2}} \right) \quad (3)$$

式中： r_2 为包层半径； U_∞ 为 0 阶第一类贝塞尔函数 J_0 的 m 阶根。

设外界温度 T 和浓度 p 发生变化时，光纤 LPFG 和 FBG 的透射谱波长变化与温度变化 ΔT 、浓度变化 Δp 存在如下相关关系：

$$\begin{cases} \Delta \lambda_L = K_{11} \Delta T + K_{12} \Delta p \\ \Delta \lambda_B = K_{21} \Delta T + K_{22} \Delta p \end{cases} \quad (4)$$

式中： K_{11} 、 K_{12} 分别为 LPFG 的温度灵敏系数、浓度灵敏系数； K_{21} 、 K_{22} 分别为 FBG 的温度灵敏系数、浓度灵敏系数，且由于 FBG 无法感知外界溶液浓度，故 $K_{22}=0$ 。

由公式(4)可得，LPFG 与 FBG 的温度、浓度、波长漂移存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_L \\ \Delta \lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta p \end{bmatrix} \quad (5)$$

对公式(5)求其逆矩阵，可得：

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_L \\ \Delta \lambda_B \end{bmatrix} \quad (6)$$

由公式(6)可知，若测得该光纤传感器对温度与浓度变化的灵敏度，即可通过光谱仪监测透射谱波长变化，代入公式(6)计算求解，实现温度与浓度的无串扰双参数监测与测量。

2 光纤传感器的制备

实验采用 Corning 公司 SMF-28 单模光纤，将光纤去除涂覆层，用酒精清洁，风干，夹至光纤夹具上。将飞秒激光功率设为 $50 \mu W$ ，加工速度 10 m/s，光栅周期 $200 \mu m$ ，占空比为 0.5，实验中，刻写 50 个周期。将所制备的 LPFG 级联 FBG 结构接入 1×2 耦合器连接光谱仪和光源，采用 Yokogawa AQ6375 光谱仪(1 200~2 400 nm)，最小分辨精度为 0.02 nm。传感介质分别为空气、水、浓度 30% 的葡萄糖溶液，1 540~1 600 nm 波段内的透射光谱如图 1 所示。

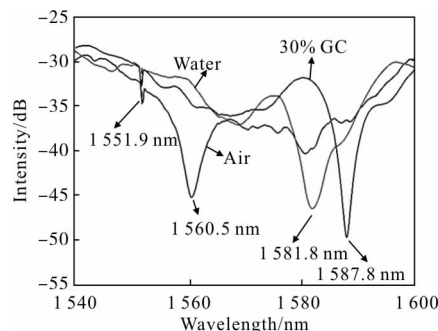


图 1 双光栅级联结构透射谱图

Fig.1 Transmission spectrums of the dual-grating cascade structure

由于 LPFG 的滤波作用，该级联光纤传感器光谱范围内出现两个明显波谷。传感介质变化时，FBG 波谷位置为 1 551.9 nm 且保持位置不变；LPFG 波谷位置分别为 1 560.5、1 581.8、1 587.8 nm，对介质的变化更为敏感。实验选取 FBG 和 LPFG 的波谷作为检测点，对两处波长漂移进行解调，验证该级联光栅结构的双参数传感特性。

3 双参数特性

3.1 温度特性

为保证实验环境的洁净度与温湿度,文中实验均在恒温 25 °C 的超净间环境内完成。

将 LPFG 级联 FBG 光纤传感结构固定在水浴槽中,使用精密温控单元进行加热和降温。考虑到葡萄糖的生物特性,当环境温度高于 50 °C 时,细胞易失活,故待测温度范围为 30~50 °C,步长 2 °C,待温度稳定后记录光谱仪中光谱数据,检测传感器的波长偏移量。

升温过程双光栅级联结构透射光谱如图 2 所示,其中,图 2(a)为 1 551~1 565 nm 光谱范围内透射光谱随温度变化图,为清晰计,分别取起始温度 30 °C、

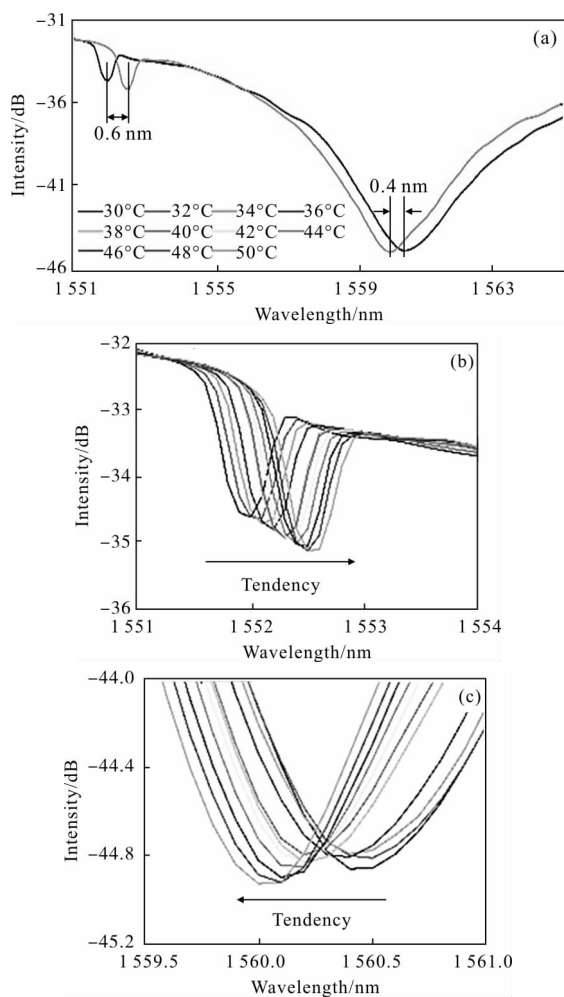


图 2 升温过程双光栅级联结构透射光谱图

Fig.2 Transmission spectrums of the dual-grating cascade structure when temperature rises from 30 °C to 50 °C

终止温度 50 °C 进行分析。结合实验数据可知,在 20 °C 温度变化范围内,FBG 波长漂移 0.6 nm,LPFG 波长漂移 0.4 nm。图 2(b)与图 2(c)分别为 FBG 与 LPFG 的波长漂移细节图。由图中可知,该双光栅级联结构的两个特征波谷随温度升高均有漂移,但变化趋势相异。当温度升高时,FBG 波谷位置发生红移,LPFG 波谷位置发生蓝移。

相似地,降温过程双光栅级联结构透射光谱如图 3 所示,整体图、FBG 细节图、LPFG 细节图分别如图 3(a)~(c)所示。结合实验数据可知,在 20 °C 温度变化范围内,该双光栅级联结构的两个特征波谷随温度降低均有漂移,但变化趋势相异。其中,FBG 波长漂移 0.6 nm,LPFG 波长漂移 0.4 nm,当温度降低时,FBG 波谷位置发生蓝移,LPFG 波谷位置发生红移。

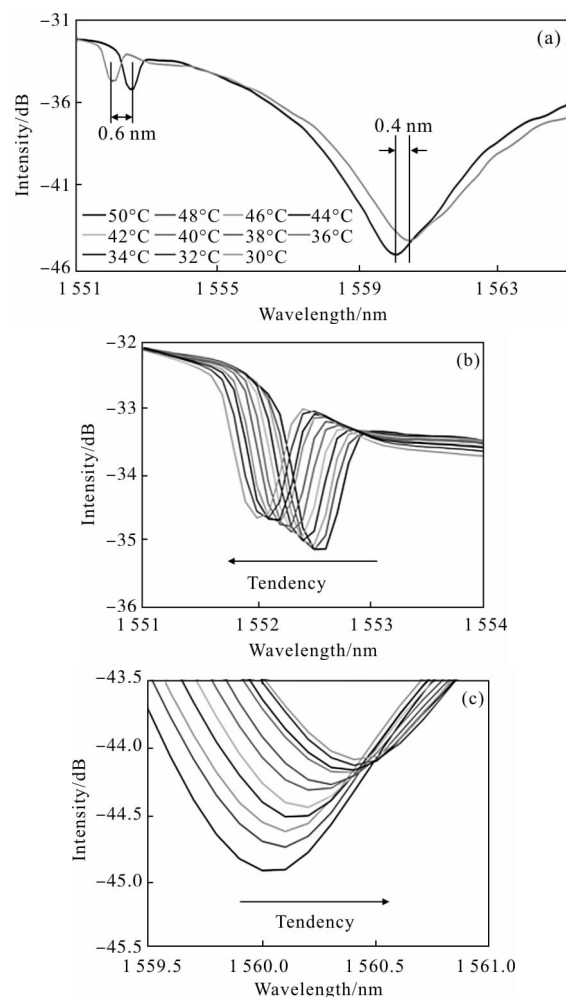


图 3 降温过程双光栅级联结构透射光谱图

Fig.3 Transmission spectrums of the dual-grating cascade structure when temperature falls from 30 °C to 50 °C

以温度变化为横轴,以波谷位置为纵轴,绘制如图 4 所示的升温、降温过程温度响应特性曲线,其中,图 4(a)为 FBG 温度传感特性曲线,图 4(b)为 LPFG 温度传感特性曲线。

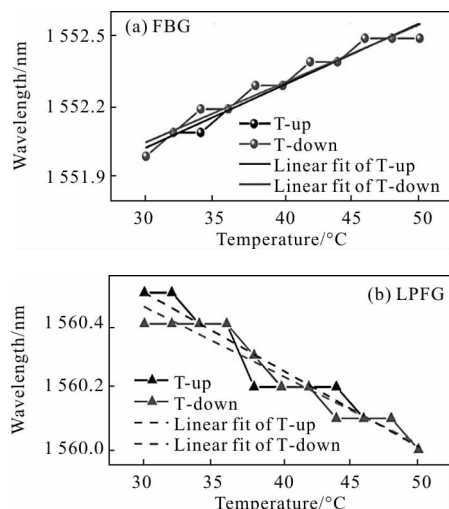


图 4 双光栅级联结构温度传感特性曲线

Fig.4 Temperature sensing characterization curve of the dual-grating cascade structure

由实验结果可知,当温度由 30℃ 升至 50℃ 时,FBG 中心波长线性增加,灵敏度 26.36 pm/℃,线性度 0.950 8;LPFG 中心波长线性减小,灵敏度 -24.55 pm/℃,线性度 0.914 2。当温度由 50℃ 降至 30℃ 时,FBG 中心波长线性减小,灵敏度 25.00 pm/℃,线性度 0.945 8;LPFG 中心波长线性增加,灵敏度为 -21.82 pm/℃,线性度 0.921 2。具体参数列入表 1 中。

表 1 双光栅级联结构温度传感特性参数

Tab.1 Characteristic parameters of temperature sensing of the dual-grating cascade structure

Temperature	Position	Sensitivity/pm · °C ⁻¹	Linearity
Warming	FBG	26.36	0.950 8
	LPFG	-24.55	0.914 2
Cooling	FBG	25.00	0.945 8
	LPFG	-21.82	0.921 2

3.2 浓度特性

采用纯度为 99.9% 的葡萄糖在室温环境中配

置不同浓度待测溶液,浓度范围 3%~30%。双光栅级联结构由夹持器固定,浸入不同浓度的葡萄糖溶液中,监测双光栅级联结构在不同浓度葡萄糖溶液中的敏感情况。不同浓度葡萄糖溶液中双光栅级联结构透射光谱及 LPFG 部分细节图如图 5 所示。结合实验数据可知,当葡萄糖溶液浓度变化时,FBG 波长不漂移。当浓度升高时,LPFG 波谷位置发生蓝移。

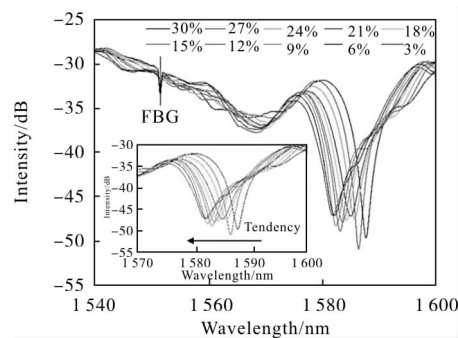


图 5 不同浓度下双光栅级联结构透射光谱图

Fig.5 Transmission spectrums of the dual-grating cascade structure under different concentration

以浓度变化为横轴,以波谷位置为纵轴,绘制如图 6 所示的浓度传感特性曲线。

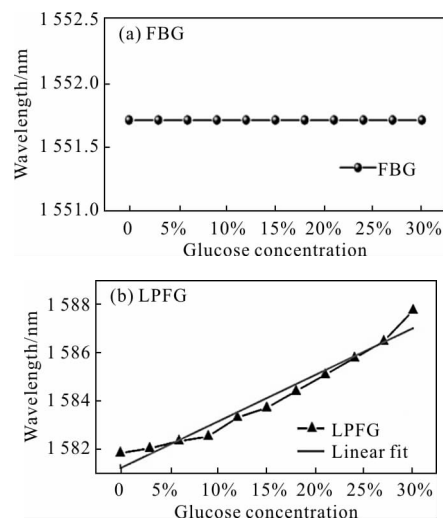


图 6 双光栅级联结构浓度传感特性曲线

Fig.6 Concentration sensing characterization curve of the dual-grating cascade structure

由实验结果可知,当浓度由 3% 增至 30% 时,FBG 中心波长不漂移,对浓度变化不敏感;LPFG 中心波长线性减小,灵敏度 196.36 pm,线性度

0.956 5。具体参数列入表 2 中。

表 2 双光栅级联结构葡萄糖溶液
浓度传感特性系数

Tab.2 Glucose solution concentration sensing
parameters of the dual-grating
cascade structure

Position	Sensitivity/pm	Linearity
FBG	0	1
LPFG	196.36	0.956 5

综上所述,该双光栅级联结构中,LPFG 对温度和浓度都敏感,FBG 仅对温度敏感。其中,温度范围 30~50℃时,FBG 的升温与降温灵敏度分别为 26.36 pm/℃和 25.00 pm/℃,LPFG 的升温与降温灵敏度分别为-24.55 pm/℃和-21.82 pm/℃。浓度范围 3%~30%时,FBG 的浓度灵敏度为 0,LPFG 的浓度灵敏度为 196.36 pm。由于存在回程误差,对上述参数取平均值作为相应的灵敏度系数并代入公式(6),可以得到该光纤传感器的温度应变传感矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -23.19 & 193.36 \\ 25.68 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_L \\ \Delta \lambda_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

在实际测量中,通过解调该光纤传感器的波长变化值,代入双参数传感矩阵公式(7),即可实时解算环境温度与待测浓度,实现对葡萄糖溶液的温度和浓度双参量动态测量。

4 结 论

文中介绍了基于飞秒激光直写加工双光栅级联结构实现葡萄糖溶液温度和浓度双参数实时监测的光纤传感器,并对该传感器温度和浓度传感特性进行了研究,建立了该光纤传感器温度/浓度与光谱特征位置波长变化之间的无串扰双参数传感数学模型,通过双参数灵敏度系数矩阵便可以实时解算环境温度和浓度。实验结果表明,温度范围 30~50℃时,LPFG 的升温与降温灵敏度分别为-24.55 pm/℃和-21.82 pm/℃,FBG 的升温与降温灵敏度分别为 26.36 pm/℃和 25.00 pm/℃;浓度范围 3%~30%时,FBG 的浓度灵敏度为 0,LPFG 的浓

度灵敏度为 196.36 pm。文中提出的双光栅级联结构形式简单,稳定性好,灵敏度高,无需对 FBG 进行特殊写制,是解决单根光纤双参数测量的有效手段,同时,文中对复杂环境下的多参数耦合测量与解耦也具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Liu Tiegeng, Wang Shuang, Jiang Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1681-1692. (in Chinese)
刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [2] Zhang Faxiang, Lv Jingsheng, Jiang Shaodong, et al. High sensitive fiber Bragg grating micro-vibration sensor with shock resistance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822002. (in Chinese)
张发祥, 吕京生, 姜邵栋, 等. 高灵敏抗冲击光纤光栅微振动传感器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0822002.
- [3] Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
- [4] Wang Huaping, Xiang Ping. Optimization design of optical fiber sensors based on strain transfer theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1233-1241. (in Chinese)
王花平, 向平. 基于应变传递理论的光纤传感器优化设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1233-1241.
- [5] Wu Jing, Wu Hanping, Huang Junbin, et al. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 311-317. (in Chinese)
吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 311-317.
- [6] Qin Haikun, Zhang Min, Liu Yuliang, et al. Review: recent research development in fiber grating biosensor [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(5): 1-3. (in Chinese)
秦海琨, 张敏, 刘育梁, 等. 光纤光栅生物传感器的研究进展综述[J]. 激光杂志, 2008, 29(5): 1-3.
- [7] Luo Tao, Gu Zheng. Progress of biological and chemical sensors based on long period grating in photonic crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(11):34-40. (in Chinese)

- 罗涛, 顾铮. 光子晶体光纤光栅在生物和化学传感器领域研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 34-40.
- [8] Yao Jianquan, Di Zhigang, Jia Chunrong, et al. Photonic crystal fiber SERS sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 96-106. (in Chinese)
- 姚建铨, 邸志刚, 贾春荣, 等. 基于表面增强拉曼散射的光子晶体光纤传感器[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 96-106.
- [9] Tong Z, Luan P, Cao Y, et al. Dual-parameter optical fiber sensor based on concatenated down-taper and multimode fiber[J]. *Optics Communications*, 2016, 358(1): 77-81.
- [10] Zhao Mingfu, Wang Nian, Luo Binbin, et al. Simultaneous measurement of temperature and concentration of sugar solution based on hybrid fiber grating sensor [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 476-482. (in Chinese)
- 赵明富, 王念, 罗彬彬, 等. 可同时测量蔗糖浓度和温度的组合光纤光栅传感器[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 476-482.
- [11] Gouveia C, Jorge P A S, Baptista J M, et al. Fabry-Pérot cavity based on a high-birefringent fiber bragg grating for refractive index and temperature measurement [J]. *Sensors Journal IEEE*, 2012, 12(1): 17-21.
- [12] Yuan J, Zhao C L, Zhou Y, et al. Reflective long-period fiber grating-based sensor with Sagnac fiber loop mirror for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 85-90.
- [13] Kang Zexin, Sun Jiang, Ma Lin, et al. Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506004. (in Chinese)
- 康泽新, 孙将, 马林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506004.
- [14] Wu S, Yan G, Wang C, et al. FBG incorporated side-open fabry-perot cavity for simultaneous gas pressure and temperature measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(16): 1-1.
- [15] Su Genghua, Xu Degang, Shi Jia, et al. A dual-parameter sensor for temperature and refractive index based on a Sagnac loop composed of an LPFG and polarization maintaining fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2017, 28(1): 25-31. (in Chinese)
- 苏耿华, 徐德刚, 石嘉, 等. 基于保偏光纤和 LPFG 的 Sagnac 环温度及环境折射率双参量光纤传感器研究[J]. 光电子·激光, 2017, 28(1): 25-31.
- [16] Wu Peng. Research on glucose concentration measuring method based on fiber-optic surface plasmon resonance technique [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- 伍鹏. 基于光纤表面等离子共振传感技术的葡萄糖浓度测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [17] Yang Ruizhu. Characterization and sensing application of long period fiber gratings [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 杨蕊竹. 长周期光纤光栅的特性及传感应用的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.