

基于 LPFG-FBG 级联结构的温湿度传感研究

李盼盼,葛海波,高敏,王 维

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710061)

摘要:为了解决单个光栅测量湿度时会受到温度影响的问题(即存在交叉敏感问题),提出了一种基于 LPFG-FBG 级联对温湿度同时测量的解决方案。利用耦合模和传输矩阵法对该方案的原理进行了理论分析,利用 Matlab 进行了反射谱仿真。仿真得到该方案温度和湿度的拟合度分别达到 0.9923 和 0.9978,表明该方案能够解决交叉敏感问题。

关键词:级联光纤光栅;温度;湿度;双参测量

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)04-0054-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of temperature and humidity sensing based on cascade LPFG-FBG

LI Panpan, GE Haibo, GAO Min, WANG Wei

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to solve the problem that temperature will affect the measurement of humidity by a single grating (there is cross-sensitivity problem), a solution based on cascade LPFG-FBG for simultaneous measurement of temperature and humidity is proposed. The principle of the scheme is theoretically analyzed by using coupled mode and transfer matrix method, and the reflection spectrum is simulated by using Matlab. The simulation results show that the fitness of temperature and humidity reaches 0.9923 and 0.9978 respectively, which shows that the scheme can solve the cross-sensitivity problem.

Key words: cascaded fiber grating; temperature; humidity; double-parameter measurement

0 引言

光纤光栅传感器因其具有小而轻、传感灵敏度高、可复用性强和抗电磁干扰能力强等诸多优点,近年来备受传感技术领域研究者的关注,并成为研究的热门课题之一^[1,2]。由于单个光纤光栅无法通过直接测量其耦合波长的漂移来区分被测参量引起的波长漂移^[3],因此严重制约了光纤光栅在传感领域的应用。为了更好地解决交叉敏感问题,研究者通过将不同的光纤光栅级联,得到不同于单个光纤光栅特点的光栅结构^[4]。目前已有的级联光栅结构有:①双布喇格光纤光

栅(FBG)结构,该结构的优点是可以实现长距离分布式传感,造价相对较低。不足之处在于需要保证 2 个 FBG 中心波长相差足够大,因此需要 2 个侧面发光二极管(ELED)和光谱仪,难以实用化。②双长周期光栅(LPFG)结构,因为 LPFG 对温度和折射率的灵敏度高于 FBG,所以该结构比第一种结构灵敏度要高,但透射波带较宽,导致复用困难,不利于分布式传感。③LPFG 与 FBG 级联结构,该结构能够使反射谱中出现 2 个窄带波,波长较大处的窄带波中心波长受 FBG 影响,波长较小处的窄带波中心波长受 FBG 和 LPFG 共同影响,2 个波的光强同时受 FBG 和 LPFG 影响^[5]。因此,对于 LPFG-FBG 级联结构,只需观测其反射谱就可以同时进行双参量测量。本文利用双光栅法以聚酰亚胺(PI)湿敏薄膜为 FBG 涂覆层,提出带涂覆层的反射型 LPFG-FBG 独立级联结构构成的光纤光栅型温湿度传感器,实现光纤光栅同时对温度和湿度的高精度测量。

收稿日期:2018-12-18。

基金项目:陕西省自然科学基金(批准号:2011JM8038)资助。

作者简介:李盼盼(1991-),男,陕西咸阳人,西安邮电大学电子工程学院 16 级硕士研究生。主要研究方向为光通信与光电子器件。在就读本科期间曾获“三好学生”荣誉称号并获三等奖学金,在就读硕士研究生期间曾获三等奖学金和“互联网+”创新创业大赛校一等奖。



1 原理分析

1.1 传感原理

外界温度、应变和折射率等因素的变化会引起光纤光栅周期和有效折射率的变化,从而引起光纤光栅反射谱和透射谱的变化,如中心波长漂移、带宽变化等。根据这一特性,将外界环境的变化与光纤光栅中心波长漂移量建立对应关系,可以实现对外界环境的参数传感。根据 FBG 耦合模相位匹配条件 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ ^[6],对两端求全微分得到:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{d\Lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

其中, λ_B 为 FBG 中心波长, n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为 FBG 光栅周期。 n_{eff} 和 Λ 容易受到外界因素(如温度、应变等)的影响,从而导致 FBG 中心波长漂移^[7]。由于湿应力会引起周期的变化,弹光效应会引起有效折射率的变化,所以将式(1)右端两项分别表示成这 2 种因子的形式,则 FBG 在湿度作用下的波长漂移量为:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = -P_e \varepsilon + \varepsilon \quad (2)$$

其中, ε 表示轴向湿应力。 $P_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \mu_r (P_{11} + P_{12})]$ 表示有效弹光系数, P_{11} 和 P_{12} 为光纤弹光系数矩阵的分量, μ_r 为光纤材料的泊松比。

通过长周期光栅相位匹配耦合模方程对温度 T 求微分得:

$$\frac{d\lambda_L}{dT} = \frac{d(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})}{dT} \Lambda + (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}) \frac{d\Lambda}{dT} \quad (3)$$

其中, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 表示纤芯基模的有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 表示包层膜的有效折射率, $\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT}$ 表示热光系数引起的纤芯基模的

有效折射率变化率; $\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{dT}$ 为包层膜有效折射率的变化率。在温度变化过程中,光纤热膨胀会引起光栅周期变化,光栅周期的变化可由热膨胀系数 α 与周期 Λ 的乘积表示。

1.2 温湿度传感分析

由于存在交叉敏感问题及 FBG 本身对湿度不够敏感,导致因湿度变化引起的波长漂移量很小^[8-10]。通过级联结构可以解决交叉敏感问题,通过在 FBG 表面增加对湿度敏感的材料,间接提高 FBG 对湿度的敏感程度,从而使湿度引起的波长漂移量增加。本文所设计的 LPFG-FBG 级联结构如图 1 所示。当湿度发生变化

时,FBG 上涂覆的湿敏薄膜吸收了待测环境中的水分开始膨胀,FBG 受到轴向湿应力,改变了光栅周期,此时 FBG 的波长也随之发生改变^[11],LPFG 不受湿度的影响。当温度变化时,光纤发生形变引起光栅周期变化,纤芯基模的有效折射率和包层模的有效折射率也发生相应的变化,从而引起光纤光栅谐振波长的改变^[12]。同时,由温度引起的热膨胀和热光效应,也会对 FBG 的周期和有效折射率产生影响。

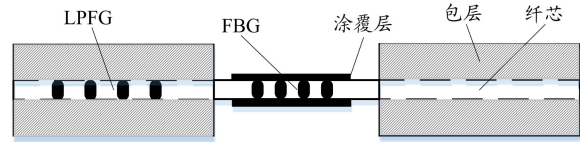


图 1 LPFG-FBG 级联结构

湿敏材料吸收水分子引起湿膨胀对光纤光栅产生湿应力,而湿应力可以表示为湿膨胀系数(即湿敏材料与光纤组合的复合材料的湿膨胀系数)在湿度变化区间上的定积分;同时由温度引起的热膨胀和热光效应对 FBG 的周期和有效折射率也会产生影响;此外温度会引起湿敏材料的热膨胀,热膨胀会对光纤光栅产生应力。以上 3 部分因素的变化都会引起 FBG 中心波长的漂移。根据弹性理论,经过分析与推导,最终可得出 FBG 的波长漂移量和温湿度变化量之间的关系:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = & (1-P_e) \beta_1 \left[1 - \frac{E_2 r_2^2}{E_2 r_2^2 + E_1 (r_1^2 - r_2^2)} C_0 \right] \Delta RH + \\ & [(1-P_e)(\alpha_1 - \alpha_2) + \alpha_2 + \xi_2] \Delta T = \\ & K_{RH} \Delta RH + K_{TB} \Delta T \end{aligned} \quad (4)$$

其中, β_1 、 E_1 和 r_1 分别表示湿敏材料的湿膨胀系数、弹性模量和复合材料的半径; C_0 是湿敏材料和光纤的黏合系数; E_2 、 r_2 分别为光纤的弹性模量和半径; α_1 、 α_2 和 ξ_2 分别表示湿敏材料热膨胀系数、光纤的热膨胀系数和热光系数, ΔRH 表示湿度变化, ΔT 表示温度变化。

由于 LPFG 没有涂覆湿敏材料,本身对湿度变化不敏感,因此 LPFG 只受到温度的变化影响,根据长周期光栅相位匹配条件,得出 LPFG 中心波长 λ_L 与其温度灵敏度 K_{TL} 的关系为^[13,14]:

$$K_{TL} = \frac{d\lambda_L}{dT} = \lambda_L Y \left[\alpha_2 + \frac{\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}} \right] \quad (5)$$

其中, ξ_{co} 、 ξ_{cl} 分别是纤芯模和包层模的热光系数; Y 表示光纤波导色散因子, $Y = 1 / \left[1 - \frac{d(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})}{d\lambda} \Lambda \right]$ 。从式(5)看出,LPFG 的温度灵敏度系数不仅和自身的热膨胀系数有关,而且会受到本身模式的热光效应影响。

2 测量方法

设外界温度为 T 和湿度为 RH , 当温度湿度发生变化时, 光纤光栅的透射谱波长也会发生相应的变化。将式(4)、式(5)简写后联立:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_L = K_{TL} \Delta T \\ \Delta\lambda_B = K_{TB} \Delta T + K_{RH} \Delta RH \end{cases} \quad (6)$$

其中, ΔT 表示温度变化量, K_{TB} 表示 FBG 的温度灵敏系数; $\Delta\lambda_L$ 、 $\Delta\lambda_B$ 分别表示 LPFG 和 FBG 的波长变化量; ΔRH 表示湿度变化量, K_{RH} 表示 FBG 的湿度灵敏系数。将式(6)改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_L \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{TL} & 0 \\ K_{TB} & K_{RH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta RH \end{bmatrix} \quad (7)$$

变化式(7)可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta RH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{TL} & 0 \\ K_{TB} & K_{RH} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_L \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, $\Delta = K_{TL} K_{RH} \neq 0$ 保证了有唯一的解。然后通过测得光纤传感器对温度与湿度变化的灵敏度, 以及反射谱波长变化量, 代入式(8)即可得到温湿度的变化量, 从而实现对温度与湿度的双参数测量。

3 仿真与结果分析

根据级联 LPFG-FBG 结构传输矩阵理论, 通过对 LPFG-FBG 反射谱进行仿真分析, 当选取如下结构参数与材料参数时, 其反射谱的反射率较高, 且反射带宽较窄, 即反射率较高的 2 个窄带波。仿真参数有: ①结构参数。LPFG 的周期为 $500\mu\text{m}$, 长度为 20mm , 纤芯平均折射率改变量为 0.00019 ; LPFG 与 FBG 之间的间隔光纤长度为 20mm ; FBG 的周期为 $0.5275\mu\text{m}$, 长度为 20mm , 纤芯平均折射率改变量为 0.0003 ; 光纤纤芯、包层的折射率分别是 1.458 和 1.450 ; 光纤纤芯和包层的直径分别是 $12.625\mu\text{m}$ 和 $62.5\mu\text{m}$; ②材料参数: 掺锗石英光纤的热线膨胀系数为 $5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, 热光系数为 $7.13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 杨氏模量为 $7.2 \times 10^{10}\text{Pa}$, 泊松系数为 0.27 。将以上参数分别代入式(4)和式(5)中, 计算可以得到: $K_{TL} = 7.52 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $K_{TB} = 9.25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $K_{RH} = 2.60 \times 10^{-6}/\%$ 。

仿真选择的湿度敏感材料参数如下: 湿敏涂层膜厚度为 $10.12\mu\text{m}$, 杨氏模量为 $2.7 \times$

10^9Pa , 湿线膨胀系数为 $8.54 \times 10^{-5}/\%$, 热线膨胀系数为 $4.66 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 泊松系数为 0.35 。FBG 的中心波长为 1548.6nm , LPFG 的中心波长为 1552.6nm 。最终得到相对湿度与 FBG 谐振波长和温度与 LPFG 谐振波长的对应关系分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 相对湿度与 FBG 谐振波长数据表		表 2 温度与 LPFG 谐振波长数据表	
相对湿度(%)	FBG 谐振波长(nm)	温度($^\circ\text{C}$)	FBG 谐振波长(nm)
40	1548.60	30	1552.61
46	1548.70	36	1552.82
50	1548.76	40	1552.98
56	1548.82	46	1553.15
60	1548.90	50	1553.26
66	1548.97	56	1553.41
70	1549.02	60	1553.56

利用 Matlab 仿真出透射率和反射率对应的谐振波长变化情况如图 2 和图 3 所示。

当湿度一定时, 中心波长与温度拟合曲线方程为 $y = 0.33276x + 1553.1$; 当温度一定时, 中心波长与湿度拟合曲线方程为 $y = 0.14738x + 1548.8$, 分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示。

从图 4(a)、图 4(b) 中可以看出温度和湿度响应都呈现较好的线性关系, 拟合度分别是 0.9923 和 0.9978 。从拟合曲线方程得到 $K_{TL} = 7.516 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $K_{T2} = 9.245 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $K_{RH} = 2.594 \times 10^{-6}/\%$ 。将这些参数取平均值

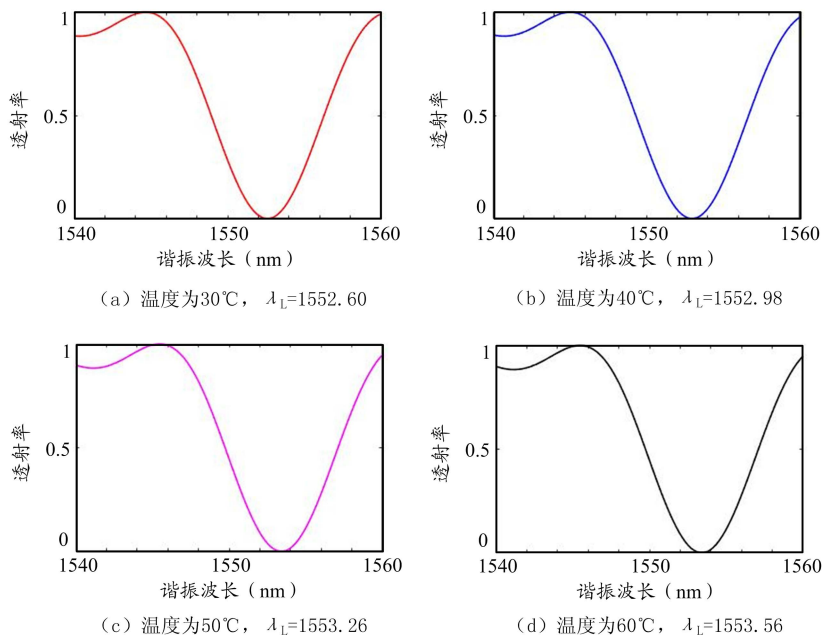


图 2 温度与 LPFG 谐振波长的关系图

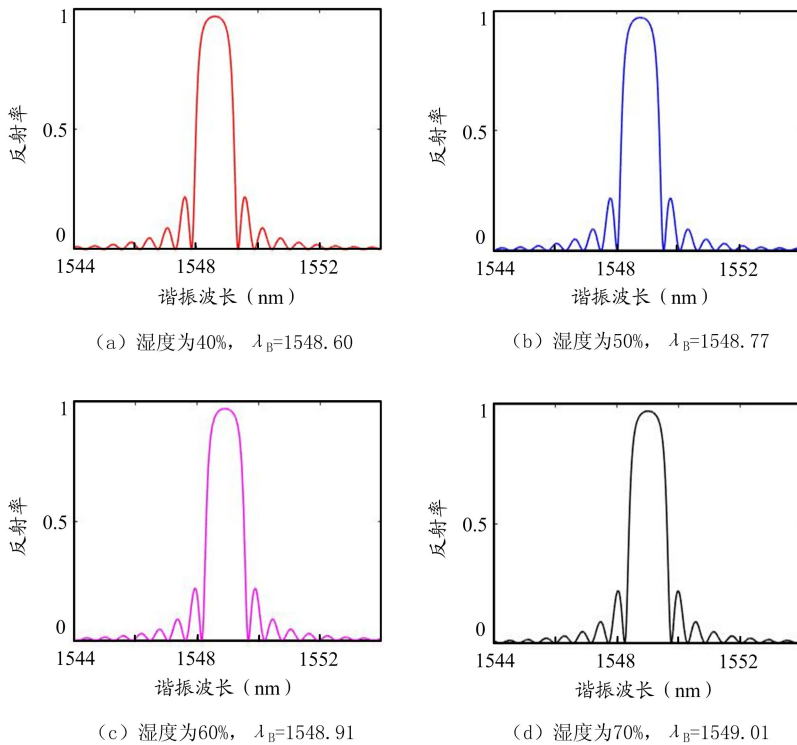


图3 湿度与FBG 谐振波长的关系图

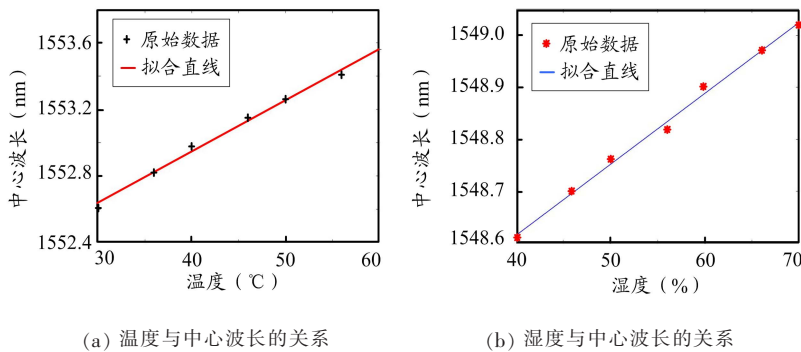


图4 温度、湿度与中心波长的关系

后,代入灵敏度系数矩阵中,就能得出该光纤传感器的温湿度传感矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta RH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.516 & 0 \\ 9.245 & 2.594 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_L \\ \Delta \lambda_B \end{bmatrix} \quad (9)$$

我们利用光谱仪通过解调的方式得到光纤光栅中心波长波长的变化率,将其代入式(9)中,即可计算出环境的温度与湿度变化值,从而达到温度和湿度同时测量的目的。

4 结束语

本文提出了以 LPFG-FBG 级联结构来实现温湿度同时测量的光纤传感器,并对温湿度特性及传感特

性进行了研究,通过建立温湿度变化量与光谱特征波长位置变化两者之间的数学模型,求解传感系数矩阵实现了环境温度湿度同时传感的目的,解决了单一光栅传感存在的交叉敏感问题。该光纤光栅传感器具有结构简单、灵敏度高和可实现双参传感的优点。本文的研究成果对复杂环境下的多参数耦合测量有着重要的参考意义,但在投向实际使用时,还应该对其响应速度和稳定性进行详细地研究及验证。

参考文献:

- [1] 文晓艳. 中美光纤传感技术研究发展与应用研讨会[J]. 国际学术动态, 2010(2):42-43.
- [2] 李涛. 光纤光栅湿度传感器的研究[D]. 杭州:中国计量学院, 2012.
- [3] 王璐. 级联光栅双模激发机理研究 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.
- [4] 赵强, 闫星魁, 张可可, 等. FBG-LPFG 级联结构研究进展[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2017(8):1-13[2018-11-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20170509.0836.008.html>.
- [5] CHEN Y, LIU B, LIU H, et al. Multi-parameter Simultaneously Sensing Based on an Optimized Concatenated FBG with LPG[J]. Journal of Optical Communications, 2015, 36(2): 1-36.
- [6] 马智桢. 光纤湿度传感器的研究和介绍 [J]. 电源技术与应用, 2012(10):31-31.
- [7] 金永君, 李海宝, 刘辉. 聚酰亚胺(PI)薄膜用于光纤布拉格光栅湿度传感器的特性分析 [J]. 大学物理, 2009, 28(7): 39-42.
- [8] 张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. 光子学报, 2003, 32(10):1166-1168.
- [9] 曾传卿. 光纤湿度传感器研究进展 [J]. 计测技术, 2010, 30(S1):11-15.
- [10] 杨子江, 黄建国. 高分子湿度传感器研究进展[J]. 中国新技术新产品, 2010(24):12-12.
- [11] 黄肖迪, 王源, 孙阳阳, 等. 涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6):1233-1240.
- [12] SU G H, XU D G, SHI J, 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(1): 25-31.
- [13] 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):82-87.
- [14] 陈美娟, 李传起, 罗德俊, 等. 高灵敏度级联长周期光纤光栅温度与应变传感的理论研究 [J]. 量子电子学报, 2015 (32):16302-228-16302-234.