

# 基于 LPFG 与锥形光纤级联的温度与应变测量传感器

邱晓驰,江超\*,陶武强,郭小珊

(湖北师范大学 物理与电子科学学院,湖北 黄石 435002)

**摘要:**工程中对具有多参量同时测量功能的光纤传感器有很大的市场需求。为了实现多参量的同时测量,将长周期光纤光栅(LPFG)与锥形光纤级联构成传感器,研究了传感器对环境温度与轴向应变的传感特性,利用传感器透射谱中2个谐振峰波谷的温度和应变灵敏度构建测量矩阵,消除了交叉敏感,完成了温度与轴向应变的同时测量。实验结果表明:传感器透射谱谐振峰波谷的中心波长随温度变化、轴向应变变化均有很好的线性关系,最大温度灵敏度达到 $40.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,最大应变灵敏度为 $-1.502 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

**关键词:**光纤传感器;长周期光纤光栅;锥形光纤;级联;温度;应变

**中图分类号:**TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)07-0023-05

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Temperature and strain measurement sensor based on LPFG cascaded with tapered fiber

QIU Xiaochi, JIANG Chao\*, TAO Wuqiang, GUO Xiaoshan

(College of Physics and Electronic Science, Hubei Normal University, Huangshi Hubei 435002, China)

**Abstract:** In engineering practice, the optical fiber sensor with multi-parameter simultaneous measurement function has great market demand. For multi-parameter simultaneous measurement, a long-period fiber grating (LPFG) and a tapered fiber are cascaded to form a sensor. The sensing characteristics of the sensor for ambient temperature and axial strain are studied. Using the temperature and strain sensitivity of the two resonant peak wave-valley in the sensor transmission spectrum, the measurement matrix is constructed to eliminate cross sensitivity and complete the simultaneous measurement of temperature and axial strain. The experimental results show that the center wavelength of the resonant peak wave-valley of the sensor has a good linear relationship with temperature and axial strain. The maximum temperature sensitivity is  $40.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  and the maximum strain sensitivity is  $-1.502 \text{ pm}/\mu\epsilon$ .

**Key words:** optical fiber sensor; long-period fiber grating; taper fiber; fiber cascades; temperature; strain

### 0 引言

长周期光纤光栅(LPFG)具有优良特性,在光纤传感领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。利用 $\text{CO}_2$ 激光器刻写的LPFG在温度、折射率、应变和湿度等传感领域被广泛应用<sup>[3-6]</sup>。2009年,LU Ping等人<sup>[7]</sup>第一次利用锥形光纤

构成马赫-曾德尔干涉仪(MZI)实现了折射率与温度的同时测量。此后,人们对光纤拉锥结构展开了研究,发现拉锥后的光纤对环境参量变化更加敏感<sup>[8-10]</sup>。近年来,人们发现采用2种或2种以上的光纤传感结构级联能够增加传感器测量范围与灵敏度,改善传感器性能,实现多参量测量<sup>[11-12]</sup>。因此,LPFG与其它光纤传感结构级联制作的传感器开始被越来越多的人研究<sup>[13-18]</sup>。这些级联结构大部分由MZI与LPFG串接构成,测量灵敏度高、线性度好,能够测量多个参量,但有些结构制作复杂、难度大或重复性相对较差。本文基于LPFG与锥形光纤的特点和优异性能,将LPFG与锥形光纤级联,优化级联参数,制备一种温度与轴向应变灵敏度同时测量的光纤传感器。

收稿日期:2021-01-07。

基金项目:2020年湖北省自然科学基金青年项目(批准号:2020CFB46)

资助;湖北师范大学2015年优秀创新团队项目(批准号:T201502)资助。

作者简介:邱晓驰(2000—),女,湖北十堰人,湖北师范大学物电学院光电信息科学与工程2018级本科生,主要研究方向为光纤光栅制作、新型光纤传感器研制,参与过新型光纤光栅与光纤传感器研发的科研项目。

\*通信作者:江超(1969—),男,博士,教授,主要从事光纤传感技术与飞秒激光微加工的研究工作。



## 1 传感器的制备与结构

LPFG 与锥形光纤构成的传感器结构示意图与光路图如图 1 所示。该传感器采用标准单模光纤(武汉长飞光纤光缆有限公司生产, 纤芯直径为  $9\ \mu\text{m}$ , 包层直径为  $125\ \mu\text{m}$ )制作。传感器的制备过程如下:

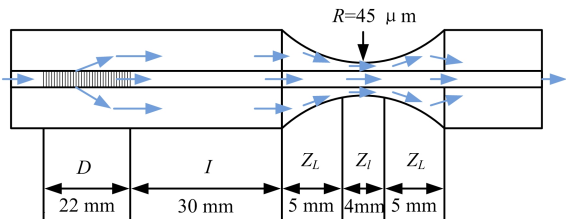


图 1 LPFG 与锥形光纤构成的传感器结构与光路图

①刻写 LPFG。采用高频  $\text{CO}_2$  激光系统在标准单模光纤上刻写 LPFG, 刻写的 LPFG 的光栅周期  $\Lambda=605\ \mu\text{m}$ , 光栅长度  $D=22\ \text{mm}$ , 在  $1400\sim 1500\ \text{nm}$  之间具有 2 个主谐振峰。

②锥形光纤的拉制。利用日本藤仓公司生产的 FSM-100P+大芯径多功能光纤熔接机进行光纤拉锥。将一段标准单模光纤的涂覆层去掉, 用丙酮擦拭干净, 将处理好的光纤固定在 FSM-100P+多功能光纤熔接机中。将熔接机设置为拉锥模式, 拉锥参数设置为: 光纤拉直最小腰部直径  $R$  为  $45\ \mu\text{m}$ , 最小腰部直锥体部分长度  $Z_I$  约为  $4\ \text{mm}$ , 两边锥形部分长度  $Z_L$  为  $5\ \text{mm}$ 。设定好参数与拉锥步骤后, 熔接机开始拉锥, 直至拉制好锥形光纤。

③LPFG 与锥形光纤级联。LPFG 与锥形光纤级联时, 它们之间的间距需要进行不断优化。把级联结构一端连接宽带光源, 另一端连接光谱分析仪, 当它们间隔不同距离时观察透射谱。经过反复对比与优化, 发现它们之间的距离为  $30\ \text{mm}$  时, 透射谱具有更好的条纹显示度。最终制备的传感器中 LPFG 与锥形光纤间隔  $I$  约为  $30\ \text{mm}$ 。

图 2 为 LPFG、LPFG+锥形光纤的透射光谱对比图。可以看出, LPFG+锥形光纤的透射谱出现了更多的谐振峰, 原来 LPFG 谐振峰基本消失, 这是因为 LPFG

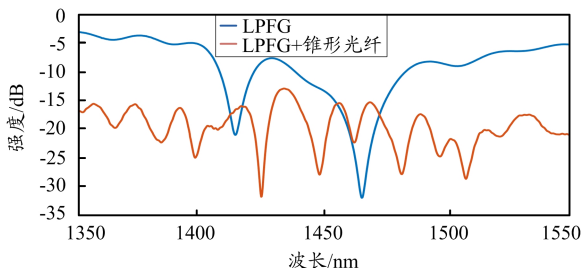


图 2 LPFG 的初始光谱与传感器的初始光谱图

与锥形光纤距离较近, 它们之间传输的模式相互作用, 形成一个等效的 MZI 干涉仪, 输出的透射谱是等效 MZI 干涉仪的透射谱。

图 3 为 LPFG+锥形光纤构成的传感器的单独光谱图, 本文通过峰值强度最大的波谷 Dip1 和 Dip2 来进行温度与轴向应变的测量。其中, Dip1 的中心波长  $\lambda_1=1426\ \text{nm}$ , 峰值强度  $A_1=-31.61\ \text{dB}$ ; Dip2 的中心波长  $\lambda_2=1448\ \text{nm}$ , 峰值强度  $A_2=-27.66\ \text{dB}$ 。波谷 Dip1 与 Dip2 相邻, 它们的自由光谱范围  $\text{FSR}=22\ \text{nm}$ , 比较适合用于传感测量。

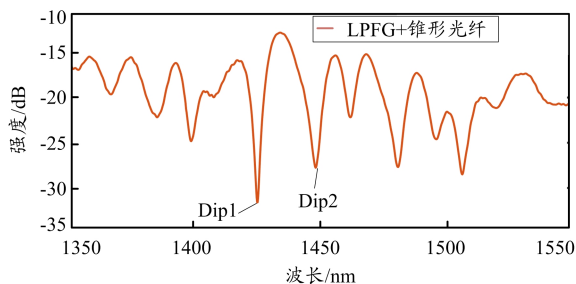


图 3 传感器的初始光谱图

## 2 温度与轴向应变灵敏度的测量原理

由 LPFG 与锥形光纤构成的传感器的光路图(图 1)可知, 当光入射到 LPFG 时, 纤芯中一部分模式被 LPFG 耦合到包层中传输, 一部分模式继续沿着纤芯传输。当传输到锥形光纤时, 光纤拉锥后纤芯与包层会缩小许多, 纤芯中模式继续在纤芯中往前传输, 而包层模式将被约束在包层内外表面传输; 当经过锥形光纤后, 2 路光又被耦合到单模光纤输出, 2 路光由于光程差而形成干涉, 构成一个等效的 MZI。为了简化分析过程, 假设沿着纤芯传输的模式为  $LP_m$  和沿着包层传输的模式为  $LP_n$ , 则这 2 路主要的光模式形成干涉。依据干涉相位条件可以得到传感器透射谱  $k$  阶谐振峰波谷的中心波长  $\lambda_k$  为:

$$\lambda_k = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2k+1}, k=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

其中,  $\Delta n_{\text{eff}}$  为光纤中  $LP_m$  模与  $LP_n$  模有效折射率差,  $L$  为传感器长度。

当传感器的外界参量发生改变时, 极易导致传感器中光纤的有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  和长度  $L$  发生变化, 使传感器的透射谱波谷中心波长  $\lambda_k$  发生漂移。观察  $\lambda_k$  漂移量, 可以通过以下方法进行温度与轴向应变灵敏度的测量:

①假设外界温度变化而轴向应变不变时, 由于光纤的热膨胀和热光效应, 外界温度变化导致光纤纤

芯和包层的有效折射率和光纤长度发生变化, 依据式(1)可得温度灵敏度  $S_T$  为:

$$S_T = \frac{\partial \lambda_k}{\partial T} = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}}{2k+1} \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{2L}{2k+1} \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} = \lambda_k \left( \frac{\partial L}{\partial T} \frac{1}{L} + \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} \frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}} \right) \quad (2)$$

其中,  $T$  为环境温度,  $\frac{\partial L}{\partial T} \frac{1}{L}$  为石英光纤的热膨胀系数 (约为  $5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} \frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}}$  为石英光纤的热光系数 (约为  $7.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )。相关数据代入式(2)可估算出传感器的温度灵敏度约为  $10.9 \sim 13.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

②假设轴向应变发生变化而温度不变时, 纤芯-包层的有效折射率差由于弹光效应而发生变化, 同时传感器长度  $L$  也会由于应变发生变化。依据式(1), 当应变变化后, 谐振峰波谷波长<sup>[18]</sup>变为:

$$\lambda_k' = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + \zeta \Delta \varepsilon)(1 + \Delta \varepsilon)L}{2k+1} = \lambda_k + \lambda_k \Delta \varepsilon + \frac{\zeta \Delta \varepsilon}{\Delta n_{\text{eff}}} \lambda_k \quad (3)$$

则谐振峰波谷波长的变化量  $\Delta \lambda_k$  为:

$$\Delta \lambda_k = \lambda_k' - \lambda_k = \lambda_k \Delta \varepsilon + \frac{\zeta \Delta \varepsilon}{\Delta n_{\text{eff}}} \lambda_k \quad (4)$$

故轴向应变的灵敏度<sup>[18]</sup>为:

$$S_\varepsilon = \frac{\partial \lambda_k}{\partial \varepsilon} = \frac{\Delta \lambda_k}{\Delta \varepsilon} = \lambda_k \left( 1 + \frac{\zeta}{\Delta n_{\text{eff}}} \right) \quad (5)$$

其中,  $\Delta \varepsilon$  表示应变的变化量,  $\zeta = -0.1649 \times 10^{-9} \text{ } \mu\text{m}^{-1}$  是石英光纤的应变-折射率系数<sup>[19]</sup>, 石英光纤中纤芯模与包层模的有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}} = 0.0042$ 。在式(5)中把量纲统一, 代入相关数据可估算出传感器的轴向应变灵敏度绝对值约为  $0.507 \sim 0.624 \text{ pm}/\mu\text{m}$ 。

因此, 在后续实验中通过观察传感器透射谱谐振峰波谷的中心波长漂移量, 能够获得温度与轴向应变的灵敏度。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 温度实验

传感器温度实验利用管式温度炉(下文简称温度炉)进行, 实验装置图如图4所示。实验所用光谱分析仪为日本横河公司生产的 AQ6370D 型号, 测量范围为  $600 \sim 1700 \text{ nm}$ , 精度为  $\pm 0.1 \text{ nm}$ ; 宽带光源为自发辐

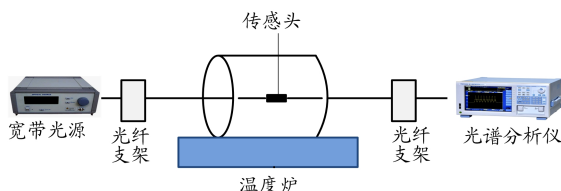


图4 传感器温度实验装置示意图

射光源, 光谱范围为  $1250 \sim 1650 \text{ nm}$ 。首先, 把制作好的传感器结构水平拉直, 两边固定好, 传感头部分放置在温度炉正中间。光从宽带光源由单模光纤输入, 经过传感器以后, 再由单模光纤输出到光谱分析仪中。实验关键仪器是温度炉, 由合肥科晶公司生产, 型号为 OTF-1200X, 最高温度为  $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 温度精度为  $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。该温度炉具有较好的温度稳定性, 管内部温度场特别稳定, 升温与降温均设定可控。在进行温度实验时, 设置好温度炉的控温程序, 炉子起始温度为  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 终止温度为  $120 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 温度每变化  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$  记录一次传感器数据。为了使数据更可靠可信, 当达到设置的记录温度点时, 保持该温度  $20 \text{ min}$ , 使温度场完全达到稳定不变, 再记录相关数据。

图5为传感器透射谱波谷 Dip1 随外界温度变化图。可以看出, 在缓慢的加热过程中, 随着温度升高, 传感器的谱线很明显地整体向右漂移(红移), 通过观察谐振峰波谷 Dip1 的中心波长随温度的变化关系, 利用波长编码进行温度测量。图6为传感器透射谱中波谷 Dip1 的中心波长随温度变化关系与拟合图。可以看出, 中心波长的漂移量与温度之间有很好的线性变化关系, 线性拟合度达到  $99.13\%$ , 得到波谷 Dip1 的温度灵敏度  $\alpha_1 = 40.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

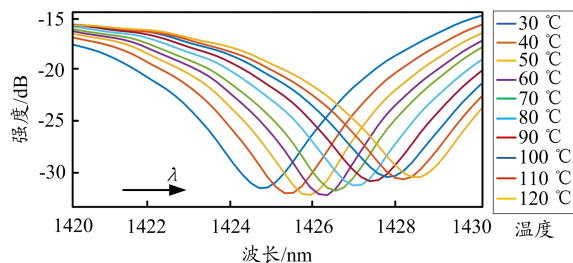


图5 传感器透射谱中波谷 Dip1 随温度的变化图

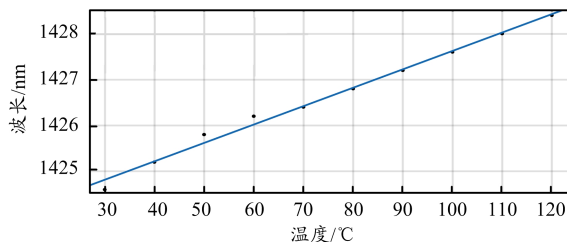


图6 波谷 Dip1 的中心波长随温度的变化关系与拟合图

图7为传感器透射谱波谷 Dip2 随外界温度变化图。可以看出, 在缓慢的加热过程中, 随着温度升高, 传感器的谱线整体明显向右漂移(红移), 通过观察谐振峰波谷 Dip2 的中心波长随温度的变化关系, 利用波长编码进行温度的测量。图8为传感器透射谱中波谷

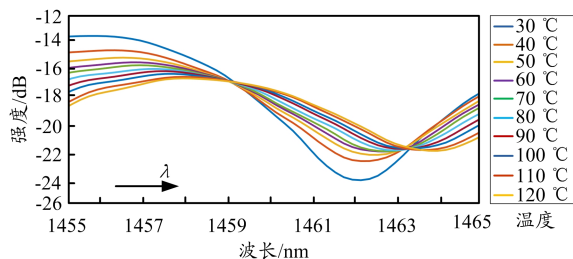


图7 传感器透射谱中波谷 Dip2 随温度的变化图

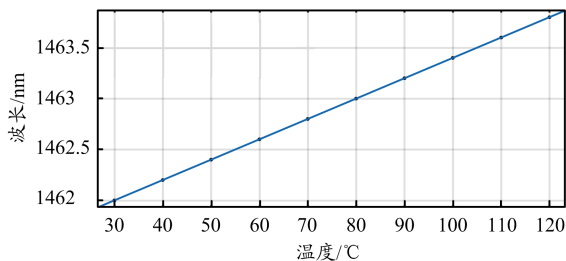


图8 波谷 Dip2 的中心波长随温度的变化关系与拟合图

Dip2 的中心波长随温度变化关系与拟合图。可以看出,中心波长的漂移量与温度之间有很好的线性变化关系,线性拟合度达到 100%。由图 8 得知,波谷 Dip2 的温度灵敏度  $\alpha_2=20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,故可以利用波长调制与解调法对环境温度进行测量,而且 LPFG+锥形光纤的级联结构的温度灵敏度是单个 LPFG 的温度灵敏度的 2 倍多。当进行降温实验时,能够得到同样的变化关系。实验测得的温度灵敏度范围与前面理论计算值在一个数量级,数值基本相近。

### 3.2 应变实验

图 9 为传感器进行轴向应变的实验装置示意图,所用光谱分析仪和宽带光源与前面温度实验一样。本文将传感头固定在 2 个等高的位移平台之间,通过调节位移平台将固定点之间的传感头调整到拉直状态,用 AB 胶把 2 个固定端粘牢,完全干燥后再进行轴向应变实验。实验时通过调节右边位移平台的千分尺给传感器施加不同的轴向应变,每转动千分尺一次,记录一次实验数据。轴向应变  $\varepsilon=\Delta d/d$ ,其中  $\varepsilon$  为对传感器施加的轴向应变变量, $\Delta d$  为右边移动平台的位移量(累计), $d$  为传感器两固定端之间距离。

传感器透射谱中波谷 Dip1 随轴向应变变化情况如图 10 所示,随着轴向应变变量增加,波谷 Dip1 的中心波长蓝移。将测得的数据用 Matlab 软件拟合得到波谷

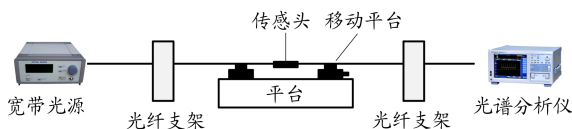


图9 传感器应变实验装置示意图

Dip1 的中心波长随轴向应变变化如图 11 所示,线性拟合度  $R^2=1$ ,波谷 Dip1 的中心波长漂移量与轴向应变变化量之间有很好的线性关系,获得波谷 Dip1 的轴向应变灵敏度  $\beta_1=-1.502 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ 。

传感器透射谱中波谷 Dip2 随轴向应变变化情况如图 12 所示,随着轴向应变变量增加,波谷 Dip2 的中心波长也蓝移。将测得的数据用 Matlab 软件拟合得到波谷 Dip2 的中心波长随轴向应变变化如图 13 所示,线性拟合度  $R^2=1$ ,波谷 Dip2 的中心波长漂移量与轴向应变变化量之间有很好的线性关系,获得波谷 Dip2 的轴向应变灵敏度  $\beta_2=-1.502 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ 。波谷 Dip1 与 Dip2 的应变灵敏度一样,故也可以利用波长调制方法对应变进行测量。实验测得轴向应变灵敏度与前面理论计

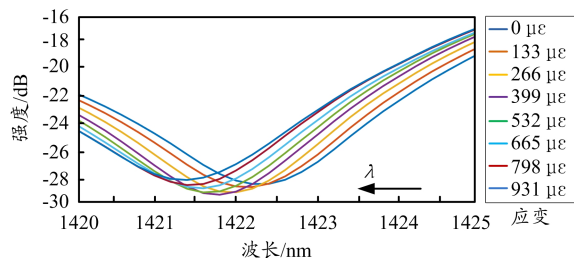


图10 传感器透射谱中波谷 Dip1 随应变的变化图

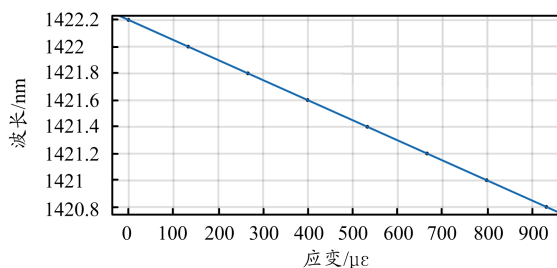


图11 波谷 Dip1 的中心波长随应变的变化关系与拟合图

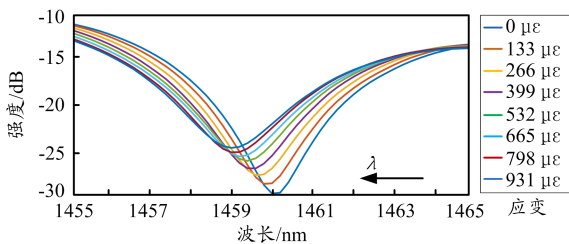


图12 传感器透射谱中波谷 Dip2 随应变的变化图

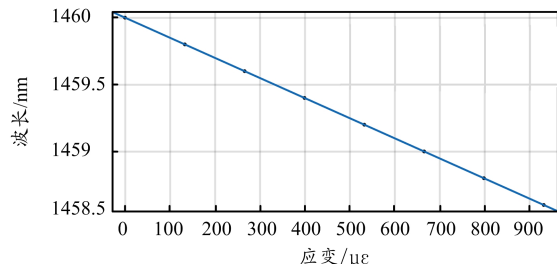


图13 波谷 Dip2 的中心波长随应变的变化关系与拟合图

算值在一个数量级, 数值基本相近。

### 3.3 结果讨论

传感器的温度与轴向应变实验结果表明: 随着外界温度与轴向应变的变化, 传感器透射谱谐振峰波谷中心波长均发生线性漂移, 利用波谷 Dip1 与 Dip2 测得的温度与轴向应变灵敏度构建传输矩阵, 实现温度与轴向应变的同时测量, 消除它们的交叉敏感。设波谷 Dip1 与 Dip2 的中心波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 当传感器的环境温度与轴向应变同时发生变化时, 均影响到中心波长漂移。假设  $\Delta\lambda_1$  和  $\Delta\lambda_2$  分别为 2 个中心波长漂移量,  $\Delta T$  和  $\Delta\varepsilon$  分别为环境温度与轴向应变的变化量,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为 2 个波谷对应的环境温度灵敏度,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为 2 个波谷对应的轴向应变灵敏度。由实验得到  $\alpha_1=40.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_2=20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,  $\beta_1=-1.502 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ ,  $\beta_2=-1.502 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ , 根据矩阵理论, 可以得到矩阵<sup>[20]</sup>为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.12 & -1.502 \\ 20 & -1.502 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} \quad (6)$$

本文对式(6)求逆矩阵可得到测量的温度与轴向应变值, 传感器实际测量值与利用公式计算值一致。

### 4 结束语

本文利用 LPFG 与锥形光纤级联构造了对温度与轴向应变均敏感的光纤传感器。传感器主要利用 LPFG 耦合出多种传输模式, 利用锥形光纤尺寸小、对外界参量更敏感特性, 在一根光纤上形成等效 MZI, 实现了多参量测量。当环境温度或轴向应变发生变化时, 传感器透射谱波谷的中心波长均发生线性变化, 利用传感器透射谱中的波谷 Dip1 与 Dip2 测得的温度与轴向应变灵敏度构建传输矩阵, 实现了温度与轴向应变的同时测量, 避免交叉敏感。该传感器具有制作容易、成本低、温度灵敏度高和重复性好等优点, 在工业、军事与民用等方面具有一定的应用价值。

### 参考文献:

- [1] BHATIA V, VENGSARKAR A M. Optical fiber long period grating sensors [J]. Optics Letters, 1996, 21(9): 692-694.
- [2] STEPHEN W J, RALPH P T. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14: R49-R61.
- [3] DAVIS D D, GAYLORD T K, GLYTSIS E N, et al. Long-period fiber grating fabrication with focused CO<sub>2</sub> laser pulses [J]. Electronics Letters, 1998, 34(3): 302-303.
- [4] RAO Y J, WANG Y P, RAN Z L, et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses[J].

Journal of lightwave technology. 2003, 21(5): 1320-1327.

- [5] 朱涛, 饶云江, 莫秋菊, 等. 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入超 LPFG 特性研究[J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5287-5292.
- [6] WANG B, ZHANG W, BAI Z, et al. CO<sub>2</sub>-laser-induced long period fiber gratings in few mode fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(2): 145-148.
- [7] LU P, MEN L Q, SOOLEY K, et al. Tapered fiber Mach - Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. Applied Physics Letter, 2009, 94: 131110-131111.
- [8] WANG P F, ZHAO H Y, WANG X F, et al. A review of multimode interference in tapered optical fibers and related applications [J]. Sensors, 2018, 18: 858-863.
- [9] 王洪海, 彭思敏, 桂鑫, 等. 基于单模 - 多模 - 单模拉锥结构的高灵敏度光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 13(56): 244-250.
- [10] WANG P F, BRAMBILLA G, DING M, et al. High-sensitivity evanescent field refractometric sensor based on a tapered multimode fiber interference [J]. Opt. Lett., 2011, 36(12): 2233-2235.
- [11] CHEN Y F, WANG Y, CHEN R Y, et al. A hybrid multimode interference structure based refractive index and temperature fiber sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(2): 331-335.
- [12] LI L C, XIA L, WUANG Y W, et al. Novel NCF-FBG interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(24): 2268-2271.
- [13] ZHANG S S, ZHANG W G, GENG P C, et al. A Mach - Zehnder interferometer constructed using lateral offset and a long period fiber grating for two-dimensional bending vector sensing [J]. Journal of Optics, 2014, 16: 015501-1-015501-6.
- [14] FRAZAO O, VIEGAS J, CALDAS P, et al. All-fiber Mach-Zehnder curvature sensor based on multimode interference combined with a long-period grating [J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3074-3076.
- [15] HUANG J, LAN X W, KAUR A, et al. Temperature compensated refractometer based on a cascaded SMS/LPFG fiber structure [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 198: 384-387.
- [16] HU D J, LIM J L, JIANG M, et al. Long period grating cascaded to photonic crystal fiber modal interferometer for simultaneous measurement of temperature and refractive index[J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2283-2285.
- [17] LI J L, ZHANG W G, GAO S C, 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.
- [18] 孙小婷, 龚华平, 解铭吻, 等. 基于同结构级联的马赫曾德光纤传感器对比研究 [J]. 光子学报, 2020, 49(10): 1006002-1-1006002-7.
- [19] GONG H, YANG X, NI K, et al. An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2014, 26(1): 22-24.
- [20] CAO Y, LIU H Y, TONG Z R, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a core-offset MZI interferometer cascaded with a long-period fiber grating[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(1): 69-72.