

文章编号 1004-924X(2017)06-1433-08

# 温度自补偿高灵敏度非本征光纤珐珀横向负载传感器

王彦<sup>1\*</sup>, 刘加萍<sup>1</sup>, 刘吉虹<sup>1</sup>, 赵凯<sup>1</sup>, 梁大开<sup>2</sup>

(1. 安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000;

2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为了提高光纤 EFPI 传感器的灵敏度, 提出了一种新型 EFPI 传感结构, 并对其温度特性以及横向负载特性进行了研究。首先, 介绍了采用端面镀钯金膜的光纤 EFPI 传感器的结构及其制作方法; 接着, 建立了镀钯金膜光纤 EFPI 的温度传感模型, 并通过 Solidworks、Hypermesh 与有限元分析软件 ANSYS 联合仿真, 对它在不同受压力下进行理论模拟, 获得了腔长变化与压力之间的关系; 最后, 对传统的光纤 EFPI 与镀钯金膜光纤 EFPI 的温度和横向负载特性进行了对比试验。试验结果表明, 镀钯金膜光纤 EFPI 的温度灵敏度为 6.083 pm/°C, 具有温度自补偿特性; 它对横向负载的检测灵敏度可达 40.83 m/g, 相对于传统的光纤 EFPI 横向负载的灵敏度提高了 2.10 倍。实验结果与理论分析相符合, 为实际制作具有温度自补偿的高灵敏度光纤 EFPI 传感器提供了理论与实验依据。

**关键词:** 光纤传感器; 光纤 EFPI; 镀钯金膜; 横向负载; 温度自补偿

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20172506.1433

## Transverse load sensor based on optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer with high sensitivity and temperature self-compensation

WANG Yan<sup>1\*</sup>, LIU Jia-ping<sup>1</sup>, LIU Ji-hong<sup>1</sup>, ZHAO Kai<sup>1</sup>, LIANG Da-kai<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangyan@ahut.edu.cn

**Abstract:** In order to improve the sensitivity of optical fiber EFPI sensors, a novel EFPI sensor structure was proposed, and its characteristics of temperature and transverse load were studied. Firstly, the structure and fabrication of the optical fiber EFPI sensor with its edge coated with palladium-gold were introduced. Then, the temperature sensing model of fiber optic EFPI coated with palladium-gold was established, and the relationship between change of cavity length and pressure was obtained in theoretical simulation of the sensor under different pressures by Solidworks, Hypermesh and finite element analysis software ANSYS. Finally, the comparison of temperature and transverse load characteristics between the traditional optical fiber EFPI and the palladium-gold coated optical fiber EFPI

收稿日期: 2017-01-15; 修订日期: 2017-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51309001); 安徽省教育厅自然科学基金重点项目 (No. KJ2017A041)

was implemented. Experimental results show that the temperature sensitivity of the palladium-gold coated optical fiber EFPI is 6.083 pm/°C due to its characteristic of temperature self-compensation. Moreover, the detection sensitivity of transverse load can reach 40.83 m/g, which has been improved by 2.10 times compared with the one of the traditional optical fiber EFPI. The experimental results coincide with the theoretical analysis, providing theoretical and experimental evidences for the production of optical fiber EFPI with high sensitivity and temperature self-compensation practically.

**Key words:** optical fiber sensor; optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer; coated palladium-gold film; transverse load; temperature self-compensation

## 1 引言

光纤传感器是近几十年来兴起的一种新型传感器,涉及许多重要的领域,主要应用在城市建设中的大桥、大坝的压力监测;电力系统中电流、温度的测量;医学及生物领域中压力、折射率检测等方面<sup>[1]</sup>。光纤传感器按照结构可分为光纤光栅传感器、光纤珐珀传感器、布里渊背向散射分布式光纤传感器等。其中,光纤珐珀传感器以其结构简单、成本低、精度高、测量范围广等特点得到了广泛的关注。

横向负载特性是光纤传感器的重要性能之一。吴飞<sup>[2]</sup>等人研究了光纤布拉格光栅横向局部受压的特性,表明在一个周期内的波长偏移相对于受力的灵敏度为 0.05 nm/N;王义平<sup>[3]</sup>等人发现高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的长周期光纤光栅的谐振波长的横向负载特性具有较强的负载方向相关性。曾祥楷<sup>[4]</sup>等人对长周期光纤光栅的横向负载特性进行了详细的理论计算,但上述理论并没有通过实验来验证。刘宏月<sup>[5]</sup>等人利用长周期光纤光栅的横向负载特性来直接监测混凝土结构中的钢筋锈蚀,但没有从理论上对长周期光纤光栅在混凝土结构中的横向负载特性进行仿真。Rui Yang<sup>[6]</sup>等人研究了基于镀 PDMS 复合材料的 S 型锥形光纤的横向负载以及温度特性,横向负载的灵敏度为 -29.03 nm/N,另外采用双波长解调法同时对横向负载和温度进行测量,但是传感器的制作工艺较复杂。A. Z. Zulkifli<sup>[7]</sup>等人提出了一种基于单模-多模简单的负载传感器,通过增加多模光纤的长度来提高监测灵敏度,不过这种传感器仅适用于监测微小的压力或横向应变。1991 年, Murphy<sup>[8]</sup>等人制作了非本征光纤珐珀传感器 (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI),

在 EFPI 中存在一个空气腔,通过测量腔长的变化可以监测环境参数,具有精细度高、波长调节范围较宽等优点,因此在工程领域中得到了广泛的应用。

本文提出的光纤 EFPI 结构采用两端镀有钯金膜的光纤端面构成空气腔,基于此结构建立了传感器的温度理论模型,并且通过 Solidworks 建立光纤 EFPI 的三维模型,Hypermesh 分配单元类型和材料、划分网格、添加约束条件以及施加载荷,然后通过与 ANSYS 联合对横向受压进行理论仿真分析。此外,对镀钯金膜光纤 EFPI 与传统的光纤 EFPI 进行温度和横向负载试验对比。试验结果表明,镀钯金膜光纤 EFPI 传感器对温度灵敏度较低,而对横向负载的灵敏度达到 40.83 pm/g,因此,可构建一种具有温度自补偿的高灵敏度光纤 EFPI。

## 2 传感器制作

本文制作的光纤 EFPI 由两根镀有高反射钯金膜的光纤端面和与外径相匹配的石英毛细管组成。选用 SMF-28 单模光纤,热膨胀系数为  $5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ,利用剥线钳去除两根光纤的保护层、涂覆层及包层,得到长度为 5~10 mm 的裸光纤,将其端面切平。裸光纤端面采用 HUMMER 离子溅射仪镀上一层钯金膜,镀膜时间为 5 min,确保膜层不宜脱落。纤芯镀膜后通过读数显微镜可测得直径为 235  $\mu\text{m}$ ,端面反射率为 80%。选用与镀膜光纤外径相匹配的内径为 250  $\mu\text{m}$  的透明石英毛细管,外径为 1 mm。在两根光纤离端面 10~15 mm 处涂覆 AB 胶,将两根镀钯金膜的光纤端面水平放置在毛细管中,对准过程中通过光谱仪观察其反射谱是否产生干涉以确定端面是否对准。随后调整 F-P 腔之间的距离,以改变传

传感器的自由谱宽。此时测得腔长  $d$  为  $323 \mu\text{m}$ ,毛细管的长度为  $50 \text{ mm}$ ,传感器长度  $L=30 \text{ mm}$ 。

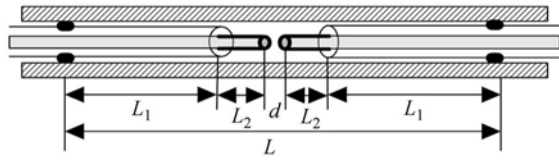


图 1 镀膜光纤 EFPI 结构图

Fig. 1 Structure of palladium-gold coated EFPI

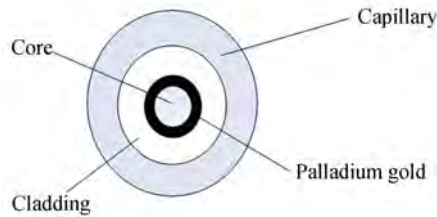


图 2 镀膜光纤 EFPI 中心横截面图

Fig. 2 Cross-section of palladium-gold coated EFPI



图 3 镀膜光纤 EFPI 传感器实物图

Fig. 3 Photo of palladium-gold coated EFPI

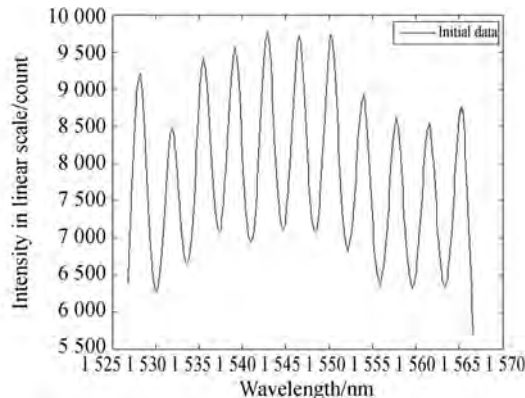


图 4 镀膜金膜光纤 EFPI 的干涉谱

Fig. 4 Interference spectrum of palladium-gold coated EFPI

图 1 为镀钯金膜光纤 EFPI 传感器的结构示意图,图 2 为其中中心横截面图,制作完成后的实物图如图 3 所示。图 4 为其光谱归一化处理后的干涉谱图,可得自由光谱宽度  $\text{FSR}=3.681 \text{ nm}$ 。根据公式  $\text{FSR}=\frac{\lambda^2}{2nd}$  可得腔长  $d=316.949 \mu\text{m}$ ,可见实验结果与理论分析一致,误差为  $1.9\%$ 。

### 3 镀钯金膜光纤 EFPI 理论分析

#### 3.1 镀钯金膜光纤 EFPI 的温度特性

随着外界温度的变化,镀钯金膜光纤 EFPI 的毛细管、光纤和光纤表面镀的钯金膜会发生热胀冷缩,使得光纤 EFPI 的腔长发生变化<sup>[9]</sup>。因此,在实际的监测过程中,温度的交叉敏感是不可忽视的问题。如图 1 所示,假定镀钯金膜光纤 EFPI 两边的结构完全对称,其长度为:

$$L=2L_1+2L_2+d. \quad (1)$$

设定  $T_0$  为室温,当温度改变  $\Delta T$  时,有:

$$\begin{cases} L=L_0+\alpha_s\Delta TL_0 \\ L_1=L_{10}+\alpha_f\Delta TL_{10}, \\ L_2=L_{20}+\alpha_c\Delta TL_{20} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $L_0$  为传感器的初始长度, $L_{10}$  为光纤包层的长度, $L_{20}$  为镀钯金膜纤芯的长度, $\alpha_s=5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$  为毛细管的热膨胀系数, $\alpha_f=1.3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$  为钯金膜的热膨胀系数,光纤的热膨胀系数  $\alpha_c=5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。

将式(2)带入式(1)可得腔长的变化  $\Delta d$  为:

$$\Delta d=d-d_0=\Delta T\alpha_s L_0-2\Delta T\alpha_f L_{10}-2\Delta T\alpha_c L_{20}. \quad (3)$$

由式(3)可见,当温度升高时,石英毛细管受热膨胀导致腔长增加,而传感器内部镀有钯金膜的光纤端面同时也受到热膨胀的影响,引起腔长减小。由于钯金膜的热膨胀系数相较于毛细管的热膨胀系数稍大,但镀膜部分的纤芯尺寸很小,因此两者的热膨胀效应对腔长的影响基本相互抵消,由此可避免温度对传感器监测时的交叉影响。

#### 3.2 镀钯金膜光纤 EFPI 横向负载的理论分析

通过 solidmorks、Hypermesh 与有限元分析软件 ANSYS 对镀钯金膜光纤 EFPI 在横向负载方向局部受压的情况下进行仿真分析。首先,通过 Solidworks 建立三维模型,然后将建好的模型导入 Hypermesh。在 Hypermesh 仿真中,选取

soild185 和 shell181 两种单元类型, 光纤、钯金、环氧树脂胶以及毛细管的弹性模量分别为 0.69, 204.431, 1, 77.8 GPa; 对应的泊松比为 0.33, 0.33, 0.3, 0.15。对已经建立好的模型添加单元类型、赋予材料属性、划分网格, 共有 1 286 792 个网格, 并且在模型底部施加全约束条件, 以上表面施加质量为 72.7 g 的压力为例, 建立的模型如图 5 所示。

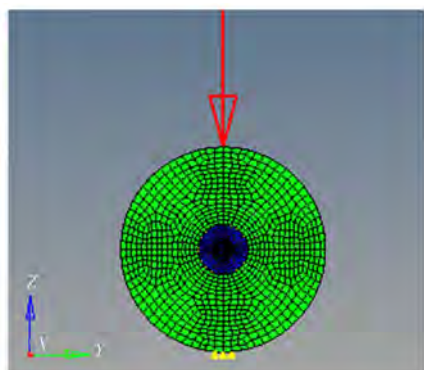


图 5 光纤 EFPI 的 Hypermesh 模型

Fig. 5 Hypermesh model of EFPI

最后, 将在 Hypermesh 中建好的镀钯金膜光纤 EFPI 模型导入 ANSYS 中进行求解, 图 6 为镀钯金膜光纤 EFPI 受横向压力产生的应变图。



图 6 镀钯金膜光纤 EFPI 传感器的应变

Fig. 6 Strain of palladium-gold coated EFPI

由图 6 可知, 此时的应变  $\epsilon = -0.174e^{-6}$ 。另外, 当横向负载作用在光纤 EFPI 时, 输出的干涉条纹发生变化, 由于干涉条纹的波长可以计算出腔长变化  $\Delta d$  与应变  $\epsilon$  的关系:

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{L}, \quad (4)$$

式中:  $L$  为 EFPI 的长度,  $L = 30$  mm, 由此从理论

上可以计算出腔长的变化  $\Delta d = 0.522 \mu\text{m}$ 。对传感器模型施加了 0~72.7 g 不同的压力, 其腔长变化如表 1 所示。

表 1 不同压力下光纤 EFPI 的腔长变化

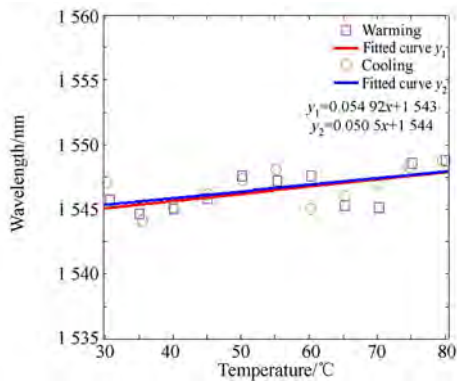
Tab. 1 Variation of cavity length of EFPI with pressure

质量/g	$\Delta d/\mu\text{m}$
7.68	0.055
15.42	0.111
23.01	0.165
30.82	0.222
38.56	0.263
48.65	0.351
60.50	0.435
72.70	0.522

## 4 实验及分析

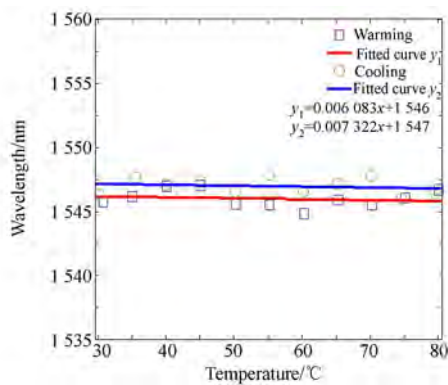
### 4.1 温度实验

随着外界温度的变化, 光纤 EFPI 外的毛细管会发生热胀冷缩而引起温度敏感问题, 为此, 对镀钯金膜光纤 EFPI 及传统光纤 EFPI 进行温度对比试验。实验系统中的光源为可调谐的 c 波段宽带光源, 工作波长为 1 525~1 565 nm, 输出功率为 10 dBm, 采用 BaySpec 波长解调模块搭建光谱检测系统, 分辨率为 1 pm, 工作波长与宽带光源的波长范围一致<sup>[10]</sup>。EFPI 反射回来的光经过解调模块后, 将实验数据送入计算机中以监测 EFPI 的干涉谱变化。系统标定采用美国 Fluke 公司 7008 型低温恒温槽, 介质为蒸馏水时, 分辨率为 0.01 °C。温度对比试验的温度设定为 30~80 °C, 温度间隔为 5 °C, 然后进行相同温度间隔的降温试验, 待达到设定的温度时, 等待 20~25 min, 在温度稳定后采集波长值。温度对比试验结果如图 7 所示, 图 7(a) 为传统光纤 EFPI 的温度与波长的关系, 其波长对温度的灵敏度为 54.92 pm/°C; 图 7(b) 为镀钯金膜光纤 EFPI 的温度与波长的关系, 其波长对温度的灵敏度为 6.083 pm/°C。结果表明, 传统的光纤 EFPI 受温度影响较高, 而镀钯金膜光纤 EFPI 受温度的影响比较低, 将它作为传感器, 可很好地避免环境温度的交叉敏感, 具有温度自补偿特性。此外, 实验表明升温与降温的拟合曲线吻合, 一致性好。



(a)传统光纤 EFPI 的温度-波长关系

(a) Relationship between wavelength and temperature of traditional optical fiber EFPI



(b)镀钯金膜光纤 EFPI 的温度-波长关系

(b) Relationship between wavelength and temperature of palladium-gold coated optical fiber EFPI

图 7 传统光纤 EFPI 与镀钯金膜光纤 EFPI 的温度特性  
Fig. 7 Temperature characteristics of traditional EFPI and palladium-gold coated EFPI

### 4.2 横向负载对比实验

本文对传统光纤 EFPI 及镀钯金膜光纤 EFPI

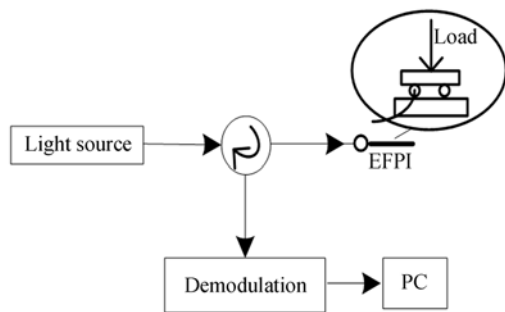


图 8 光纤 EFPI 横向负载实验结构框图

Fig. 8 Schematic diagram of transverse load experiment of optical fiber EFPI

的横向负载特性进行了试验对比<sup>[11-15]</sup>。光纤 EFPI 横向负载实验平台如图 8 所示,两根相同的毛细管平行放置在平滑的仪器台上,其中一根是制作好的镀钯金膜光纤 EFPI,另一根则是毛细管,上方放置一块表面平整的宽度为 2.5 cm 的铝板,以减小实验误差。加在铝板上的最大质量为 145.4 g,两根毛细管的长度共 60 mm,则每根毛细管上承受的最大横向负载为 0.024 N/mm。

#### 4.2.1 传统光纤 EFPI

用相同的制作方法制作传统的光纤 EFPI,毛细管的长度为 50 mm,内径为 250 μm,外径为 1 mm,传感器长度  $L=30$  mm,腔长  $d=309$  μm,自由谱宽  $FSR=4.204$  nm。图 9 为传统光纤 EFPI 受到横向负载时 1 538~1 554 nm 的局部干涉谱,选取单峰干涉波长为 1541.931 nm。从图中可见,随着横向负载的变大,频谱向短波方向移动;光强基本不变。

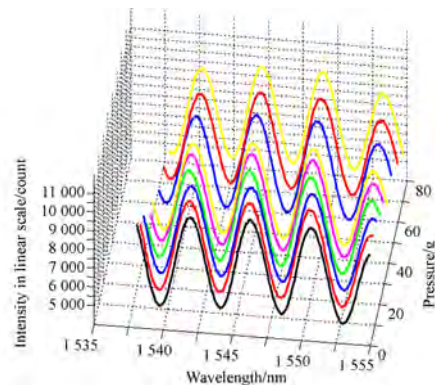


图 9 传统光纤 EFPI 不同横向负载下的干涉谱

Fig. 9 Interference spectra of traditional EFPI under different transverse loads

图 10 为传统光纤 EFPI 的波长与横向负载的关系,同样施加 0~72.70 g 的横向负载,单峰波长由 1 541.823 nm 蓝移减小到 1 540.510 nm,变化 1.313 nm,波长对横向负载的灵敏度为 19.46 pm/g。

#### 4.2.2 镀钯金膜光纤 EFPI

实验中,对制作好的镀钯金膜光纤 EFPI 施加横向负载,图 11 为波长在 1 538~1 554 nm 内的干涉条纹局部放大图,选取干涉谱单峰波长 1 542.869 nm,随着横向负载从 0 g 到 145.4 g 增加,单峰波长变化依次为 1 542.481, 1 542.020, 1 541.820, 1 541.429, 1 541.328, 1 540.843, 1 540.280, 1 539.825 nm。由图可见,随着压力的增加,干涉谱向左移动,并且光强逐渐减小。

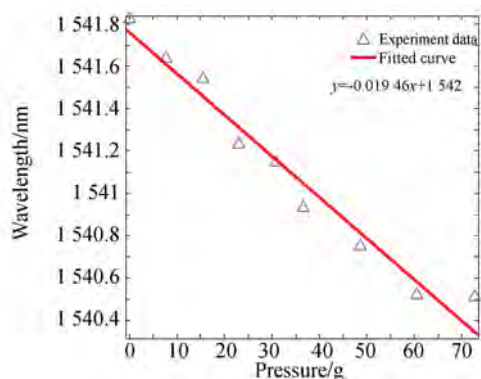


图 10 传统光纤 EFPI 横向负载-波长的关系

Fig. 10 Relationship between wavelength and transverse load of traditional EFPI

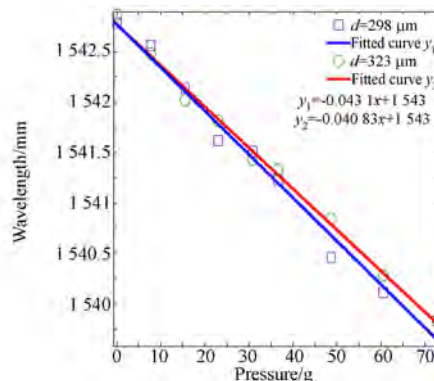


图 13 镀钯金膜光纤 EFPI 横向负载-波长的关系

Fig. 13 Relationship between wavelength and transverse load of palladium-gold coated EFPI

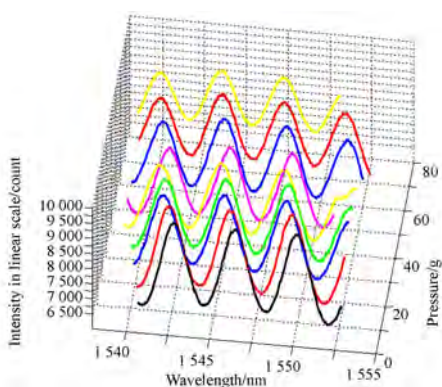


图 11 镀钯金膜光纤 EFPI 不同横向负载下的干涉谱

Fig. 11 Interference spectra of palladium-gold coated EFPI under different transverse loads

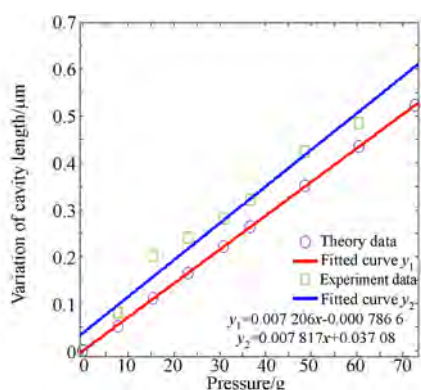


图 12 镀钯金膜光纤 EFPI 的横向负载-腔长变化的关系

Fig. 12 Relationship between variation of cavity length and transverse load of palladium-gold coated EFPI

图 12 是镀钯金膜光纤 EFPI 的横向负载与腔长变化的关系,可见随着压力的增加,腔长的变

化范围不断扩大,最大变化范围为  $0.694 \mu\text{m}$ ,而且实验值与理论值一致,误差为  $7.8\%$ 。横向负载与波长的关系如图 13 所示,腔长  $d=323 \mu\text{m}$  的镀钯金膜光纤 EFPI 的波长对横向负载的灵敏度为  $40.83 \text{ pm/g}$ 。

为了验证镀钯金膜光纤 EFPI 灵敏度的重复性,制作了另外一个腔长为  $298 \mu\text{m}$  的镀钯金膜光纤 EFPI,进行横向负载实验,结果如图 13 所示。由图可知,波长对横向负载的灵敏度为  $43.1 \text{ pm/g}$ ,同样具有较高的横向负载灵敏度。

## 5 结 论

本文制作了具有高反射率端面的光纤 EFPI,从理论上建立了传感器的温度模型,并且通过 solidworks、Hypermesh 与有限元 ANSYS 软件对它在横向局部受压的情况下压力与应变的关系进行了仿真研究,从而得到应变与腔长变化的关系。为了验证理论分析结果,通过实验对比研究了镀钯金膜光纤 EFPI 和传统光纤 EFPI 的温度特性。结果表明,当温度从  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  升至  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  时,传统光纤 EFPI 对温度的灵敏度为  $54.92 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,而镀钯金膜光纤 EFPI 对温度的灵敏度仅为  $6.083 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,而且降温与升温过程中温度灵敏度具有很好的重复性,可以很好地解决温度交叉敏感问题。同时,为了研究光纤 EFPI 的横向负载特性,对传统光纤 EFPI 及镀钯金膜光纤 EFPI 进行了横向负载试验。结果表明,本文提出的光纤 EFPI 对横向负载的灵敏度可达  $40.83 \text{ pm/g}$ ,相对于传统光纤 EFPI 对横向负载的灵敏度  $19.46 \text{ pm/g}$ ,

提高了2.10倍,实验与理论分析误差为7.8%。在后期的工作中,采用腔长更短、精细度更高、更薄的毛细管,镀钽金膜光纤EFPI的测量灵敏度

有望进一步提高,并且在实际应用中宜用波长解调。镀钽金膜光纤EFPI具有灵敏度高、温度交叉敏感特性低等优点,未来具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 卢一鑫,杨璐娜. 光纤传感器的应用现状及未来发展趋势[J]. 科技信息, 2011(3): 113-114.  
LU Y X, YANG L N. Development and applications of optical fiber sensor[J]. *Science & Technology Information*, 2011(3): 113-114. (in Chinese)
- [2] 吴飞,李立新,李亚萍,等. 光纤Bragg光栅横向局部受力特性的研究[J]. 光电子·激光, 2005, 16(11): 1270-1273.  
WU F, LI L X, LI Y P, *et al.*. Study of fiber Bragg grating characterization by transverse force to a small grating section[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(11): 1270-1273. (in Chinese)
- [3] 王义平,饶云江. 新型长周期光纤光栅的横向负载特性及其偏振相关性研究[J]. 光子学报, 2005, 34(8): 1195-1200.  
WANG Y P, RAO Y J. Study on transverse-load characteristics and polarization dependence of novel long period fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(8): 1195-1200. (in Chinese)
- [4] 曾祥楷,饶云江,梁快. 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0106002.  
ZENG X K, RAO Y J, LIANG K. Characteristic analysis of LPPG resonance wavelength shift owing to transverse load[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106002. (in Chinese)
- [5] 刘宏月,梁大开,韩晓林. 基于长周期光纤光栅横向负载特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406003.  
LIU H Y, LIANG D K, HAN X L. Long-period fiber grating transverse load effect-based sensors for rebar corrosion in concrete[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0406003. (in Chinese)
- [6] YANG R, YU Y S, ZHU C C, *et al.*. PDMS-coated S-tapered fiber for highly sensitive measurements of transverse load and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(6): 3429-3435.
- [7] ZULKIFLI A Z, MASNAN S E F, AZMI N M, *et al.*. A simple load sensor based on a bent single-mode-multimode-single-mode fiber structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 242: 106-110.
- [8] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENG-SARKAR A M, *et al.*. Fabry-Perot fiber-optic sensors in full-scale fatigue testing on an F-15 aircraft [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(4): 431-433.
- [9] 赵子文,王为宇,张敏,等. 通过改进非本征法布里-珀罗干涉型光纤传感器结构实现温度补偿的新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090605.  
ZHAO Z W, WANG W Y, ZHANG M, *et al.*. A new temperature compensation method by optimizing the structure of extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090605. (in Chinese)
- [10] 王彦,赵凯,刘加萍. 基于体相位光栅色散解调的布拉格光纤光栅温度监测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101202.  
WANG Y, ZHAO K, LIU J P. Optical fiber Bragg grating temperature monitoring based on volume phase grating dispersion demodulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101202. (in Chinese)
- [11] 张雨彤,肖尚辉,江艳,等. 一种基于DSP的便携式光纤EFPI传感器解调仪[J]. 光学技术, 2015, 41(6): 485-488.  
ZHANG Y T, XIAO SH H, JIANG Y, *et al.*. A DSP based portable demodulator for the measurement of optical fiber EFPI sensors[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(6): 485-488. (in Chinese)
- [12] CHEN K, ZHOU X L, YANG B K, *et al.*. A hybrid fiber-optic sensing system for down-hole pressure and distributed temperature measurements[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 73: 82-87.
- [13] 于清旭,贾春艳. 膜片式微型F-P腔光纤压力传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2887-2892.  
YU Q X, JIA CH Y. Diaphragm based miniature fiber optic pressure sensor with F-P cavity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2887-2892. (in Chinese)

- [14] 吴入军, 郑百林, 贺鹏飞, 等. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 24-30.  
WU R J, ZHENG B L, HE P F, *et al.*. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 24-30.
- (in Chinese)
- [15] PODDAR G C, KUMAR A, DAS S, *et al.*. Fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor for high blast pressure measurement[J]. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 2015, 53(9): 573-578.

作者简介:



王彦(1975—),女,浙江庆元人,博士,教授,硕士生导师,2008年于南京航空航天大学获得博士学位,现为安徽工业大学电气与信息工程学院光纤传感技术研究所所长,主要从事智能监测与控制、光纤传感技术、结构健康监测等方面的工作。E-mail: wangyan@ahut.edu.cn.