

## 超短腔光纤法布里-珀罗低温传感技术研究

刘钦朋<sup>1,2</sup>, 王春芳<sup>1</sup>, 刘望飞<sup>1</sup>, 高宏<sup>1</sup>, 王安立<sup>2</sup>, 李生辉<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学理学院陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

2. 中国石油集团测井有限公司, 陕西 西安 710069)

**摘要:**针对低温大范围高灵敏温度测量需求,提出一种适用于低温环境测量的光纤法布里-珀罗腔温度传感器,并实验研究传感器的响应特性。超短空气腔法布里-珀罗温度传感器由外径0.3 mm的石英毛细管和单模光纤构成,利用高热膨胀系数的材料作为腔镜的一个反射面提高空气腔的温度灵敏度,理论分析了法布里-珀罗干涉仪的温度传感原理,以及温度灵敏度的影响因素,并分析不同级次对灵敏度的影响。研制了大自由谱低温高灵敏度传感器,实验结果表明,传感器在-40℃至-10℃的温度范围内具有较好的温度响应特性,相应的灵敏度为-2.066 nm/℃,线性拟合度为0.9697,理论分辨率为±0.0005℃。传感器具有体积小、灵敏度高和测量范围大等优点,在低温传感领域具有潜在的应用价值。

**关键词:**光纤传感;法布里-珀罗干涉仪;大自由谱;低温;高灵敏

**中图分类号:**TP212 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.016

## Research on ultrashort cavity fiber Fabry-Perot cryogenic sensing technology

LIU Qin-peng<sup>1,2</sup>, WANG Chun-fang<sup>1</sup>, LIU Wang-fei<sup>1</sup>, GAO Hong<sup>1</sup>, WANG An-li<sup>2</sup>, LI Sheng-hui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Photoelectric Logging and Detecting of Oil and Gas, Shaanxi Province, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. CNPC Logging Co., Ltd., Xi'an 710069, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of low temperature, wide range and highly sensitive temperature measurement, an optical fiber Fabry-Perot (FP) cavity temperature sensing technology for low temperature environment is proposed, and the response characteristic of the sensor is studied experimentally. The ultrashort air FP cavity sensor consists of a 0.3mm capillary tube and a single-mode optical fiber. The material with high thermal expansion coefficient is used as a reflector of the cavity mirror to improve the temperature sensitivity of the sensor. The temperature sensing principle of FP cavity and the influencing factors of temperature sensitivity are analyzed theoretically, and the influence of different orders on sensitivity is analyzed. The experimental results show that the proposed temperature sensor possesses sensitivity of -2.066 nm/℃ in the range of -40℃ to -10℃. The linearity is 0.9697, with a theoretical resolution of . The sensor has the advantages of small volume, high sensitivity and large measurement range, which has potential application value in the fields of low temperature sensing.

**Keywords:** fiber sensor; Fabry-Perot interferometers; large free spectrum; low temperature; high sensitivity

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61735014; No. 61927812); 陕西省教育厅项目(No. 18JS093); 西安石油大学研究生创新基金项目(No. YCS20111009; No. YCS20111008)资助。

**作者简介:**刘钦朋(1977-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感及其应用方面的研究。E-mail: lqp1977@163.com.

**通讯作者:**王春芳(1995-),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 914635591@qq.com

**收稿日期:**2021-07-02; **修订日期:**2021-08-25

## 1 引言

温度是工业制造、生物医学、燃料储存等许多领域中基础和重要的物理参数。冻土是一种对温度极为敏感的土体介质,温度会诱发冻胀和融沉等冻融灾害,对区域公路、铁路、输油管道和机场运行带来不利影响,增加其维护成本。因此,对冻土区建筑的温度监测也尤为重要。对于温度的检测需要借助温度传感器来实现,光纤温度传感器因结构紧凑、制作方便、体积小、不受电磁干扰等优点而受到了广泛关注<sup>[1-5]</sup>。温度传感机理是环境或待测温度调制光信号的强度、相位、频率、偏振、波长等特征参量,通过解调光信号的这些特征参量的变化,获得被测对象的温度状态。根据不同的光纤传感器调制光信号的特征参量不同,可分为以下四类:波长调制、相位调制、光强调制以及偏振态调制<sup>[6-11]</sup>。光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)传感器是一种最常见的相位调制型传感器,按照其腔体材质的不同可分为两类:本征型光纤 FP 传感器和非本征型光纤 FP 传感器。本征型是指其 FP 腔介质为光纤,非本征型则是 FP 腔介质为除光纤外的空气或者其他物质。本征型光纤温度传感器的理论测量温度通常都可以达到光纤所使用材料的熔点,在高温测量领域受到研究者的广泛关注<sup>[12-15]</sup>。然而,由于光纤材料较低的热膨胀系数和热光系数,本征型光纤温度传感器的灵敏度较低,因此,增敏技术成为光纤 FP 传感器的一个研究热点问题,主要集中在新型光纤 FP 结构增敏、双腔构造游标效应增敏以及填充介质增敏三种增敏技术。Joel Villatoro<sup>[16]</sup>等人通过标准电弧放电技术将传统单模光纤和折射率导引光子晶体光纤拼接在一起形成微气泡式 FP 腔,在 22 ~ 500 °C 温度范围内,传感器的灵敏度小于 1 pm/°C, Jiang Xiaogang<sup>[17]</sup>等人提出将腐蚀后的多模光纤经电弧放电后形成 FP 腔,在 20 ~ 1000 °C 范围内,传感器温度灵敏度为 2 pm/°C。基于石英光纤的 FP 腔传感器的不足是石英材料对光学腔程改变的效果十分有限,传感器的灵敏度通常都不高<sup>[18]</sup>。房一涛<sup>[19]</sup>等人提出采用液体腔的 FP 结构,在 30 ~ 50 °C 范围内,传感器的灵敏度为 243 pm/°C,杨易<sup>[20]</sup>等人提出将两个 FP 腔串联产生游标效应,利用游标效应解调,在 15 ~ 80 °C 范围内,传感器的灵敏度提高到了 179.30 pm/°C。然而,由于光纤 FP 腔温度传感器的测温机理,基于

FP 腔的温度传感器的灵敏度和测温范围是相互制约的,因此,灵敏度提高的同时,传感器的温度测量范围在变小。

本文针对光纤 FP 腔温度传感器灵敏度和测量范围的矛盾关系,提出一种基于超短腔大测量范围的反射型光纤 FP 腔低温传感器,利用超短腔来扩展 FP 腔的自由光谱范围,构造反射型光路提高光纤 FP 腔传感器的应用性,利用聚合物封装材料提高空气腔的温度灵敏度,同时作为光纤 FP 腔的一个反射腔镜。基于以上几个关键设计理念,可有效实现大范围高灵敏低温温度的精确测量,实验结果表明,传感器具有较好的低温传感特性,有望满足冻土等环境的低温高精度测量需求,具有潜在的实际应用价值。

## 2 传感原理

### 2.1 传感器设计和工作原理

基于超短腔 FP 传感器的结构如图 1 所示,为降低传感器对待测环境的影响,将传感器设计成探针结构,在外径为 0.3 mm 的石英毛细管内搭建光纤 FP 腔,单模光纤的端面构成 FP 腔的一个反射面 M1。在毛细管的另一端填充低温光学性能良好的聚合物作为 FP 腔的另一反射面 M2,实现反射式光纤 FP 腔,并借助聚合物的高热膨胀系数来提高传感器的灵敏度,从而构造一个超短探针式反射型光纤 FP 腔。图 1 中  $L$  表示腔长,当入射光从单模光纤芯中传播到第一个端面 M1 时,一部分光被反射,另外一部分光继续传播,该部分光传输到第二个端面 M2 时,再次发生反射进入 FP 腔,这样多次反射就形成了多光束干涉仪。

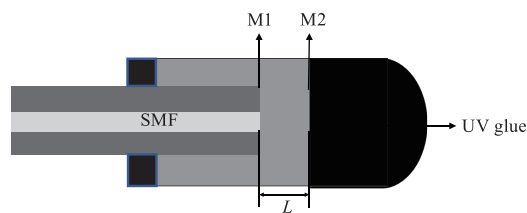


图 1 FPI 光纤温度传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the proposed device

根据多光束干涉原理可知,FP 腔反射光输出强度为:

$$I_r = A_0^2 \left[ \frac{4R\sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{(1-R)^2 + 4R\sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \quad (1)$$

式中,  $A_0$  为入射光的振幅;  $R$  是两端面的反射率, 因为固化后紫外胶的折射率(1.470)和光纤纤芯的折射率(1.450)相差不大, 因此可认为 FP 腔两边反射端面的反射率相等,  $\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda}$  为光在谐振腔内传输导致的相移, 其中;  $n$  是腔内介质(即空气)的有效折射率;  $L$  是 FP 腔的腔长;  $\lambda$  为入射光在真空中的波长; 由于 M1 端面与 M2 端面的反射率较低, 干涉光光强可以近似用双光束干涉表示为:

$$I_r = I_1 + I_2 \pm 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi) \quad (2)$$

考虑到光在传播过程中的半波损, 因此相移  $\phi$  满足  $\pi$  的奇数倍时, 干涉谱中对应出现谐振波谷, 则干涉光谱中波谷所对应的中心波长可表示为:

$$\frac{4\pi nL}{\lambda_m} = (2m + 1)\pi \quad (3)$$

式中,  $\lambda_m$  为光纤 FP 腔的干涉光谱中  $m$  级次波谷所对应的中心波长。当温度  $T$  改变时, FPI 的传感机制是环境温度调节腔长,

$$L = L_0 + \alpha \Delta T \quad (4)$$

式中,  $L_0$  是 FP 腔的初始腔长;  $\alpha$  是聚合物的热膨胀系数;  $\Delta T$  是传感器所处外界环境温度的变化量。从式(3)和式(4)可以看到, 干涉结构的光程差( $OPD = nL$ )与温度的变化成正比, 从而导致光谱的漂移。因此, 基于 FP 腔的光纤温度传感器响应可归因于腔的热膨胀效应和热光效应, 相应的温度灵敏度可表示为:

$$S_T = \frac{4nL}{(2m + 1)} \times \left( \frac{1}{n} \times \frac{dn}{dT} + \frac{1}{L} \times \frac{dL}{dT} \right) \quad (5)$$

式中,  $\frac{1}{n} \times \frac{dn}{dT}$  和  $\frac{1}{L} \times \frac{dL}{dT}$  分别表示腔的热光系数和热膨胀数, 此处谐振腔壁毛细管材料为石英, 单模光纤的主要组成成分也是石英, 二者的热膨胀效应对腔产生的作用相抵消, 因此对光学腔程作用效果明显的是端面的聚合物的热膨胀效应, 腔内介质为空气, 其热光系数在室温和标准大气压下约为  $-5.6 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。通过填充聚合物作为光纤 FP 腔反射端面来提高腔的热膨胀系数, 温度变化时, 聚合物发生热胀冷缩, 导致 FP 腔长度发生改变, 腔内干涉光产生相位差, 从而实现传感器对温度的高灵敏响应。

## 2.2 传感器的制作

基于超短腔光纤 FP 低温传感器的制作, 首先, 使用光纤剥线钳去除单模光纤(SMF-28)的涂覆层, 然后使用光纤切刀将其端面切割平整, 再将内径为

0.15 mm、外径为 0.3 mm 的石英毛细管长度切割至 20 mm。将毛细管浸入紫外胶(DDY7203-1)中近 10 s, 由于毛细管的虹吸效应, 紫外胶逐渐被吸入毛细管内部。然后, 将毛细管暴露于紫外灯下约 5 min, 使紫外胶完全固化。待紫外胶完全固化后, 将毛细管从另一端再切割一次, 使其总长度小于 10 mm, 因为在内径一定的情况下, 毛细管的虹吸效果和长度有关, 为了操作的便捷, 在填充紫外胶时, 可以让其尺寸长一点。最后, 将切割好的单模光纤从毛细管另一端插入, 利用高精度微位移平台严格控制光纤端面和紫外胶端面之间的距离, 观察其反射光谱。当反射谱的自由谱显示出需要长度时, 控制紫外胶的用量使其稳固粘合光纤与毛细管。FP 腔的自由谱可表示为:

$$FSR = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{2nL} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

待紫外胶固化完成后, 使用光学显微镜(O-LYMPUS-SZ61)对制备的传感器结构进行观测, 显微镜像图如图 2 所示, 为 FP 腔在 40 倍物镜下的镜像图, 用标尺测得腔长大约为 14  $\mu\text{m}$ , 保证了 FP 腔尺寸的结构紧凑, 可以将其封装为小探针结构。

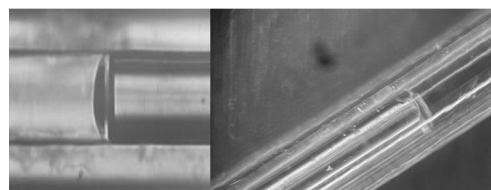


图2 FPI 传感结构影像图

Fig. 2 FPI structural images

因为传感器在不同级次的温度灵敏度是有微小差别的, 由公式(5)知光纤 FP 腔的不同级次的灵敏度不同, 图 3、图 4 给出了传感器的温度测量范围与自由谱宽的关系以及传感器灵敏度随级次的变化关系。图 3 显示, 随着 FP 腔自由谱变大, 传感器的测温范围也在变大, 表明自由谱宽对扩展测温范围尤为重要。从图 4 可以看到, 干涉级次的变化对传感器的灵敏度有影响, 所以不同级次间的灵敏度不是严格一致的。因此, 在同一个级次的测量, 对传感器的测量精确度至关重要。为了观察 FP 腔腔长对自由谱的影响, 图 5 给出了模拟计算得到的不同腔长所对应的三束反射光谱, 各参数分别设置为:  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1$ ,  $n_3 = 1$ ,  $L_1 = 120 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 80 \mu\text{m}$ ,  $L_3 = 30 \mu\text{m}$ 。可以看到, 随着 FP 腔的腔长变短, 干涉光谱的自由谱宽在相应地变大, 因此通过超短腔来实现大自由

谱,进而扩展温度测量范围的方案是可行的。当传感器制备完成后,其自由谱宽度和灵敏度也就相应地确定了,传感器同一个级次的测温范围  $\Delta T_{\text{FP}}$  是由自由谱范围和灵敏度决定的,即:

$$\Delta T_{\text{FP}} = \frac{\text{FSR}}{S_T} \quad (7)$$

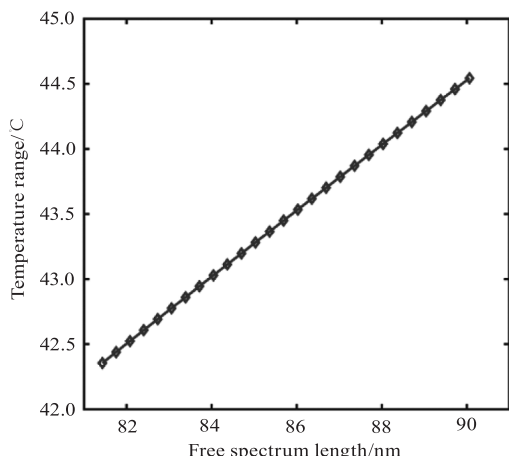


图3 传感器的温度测量范围与自由谱宽的关系

Fig. 3 The relationship between temperature measurement range and free spectrum width of the sensor

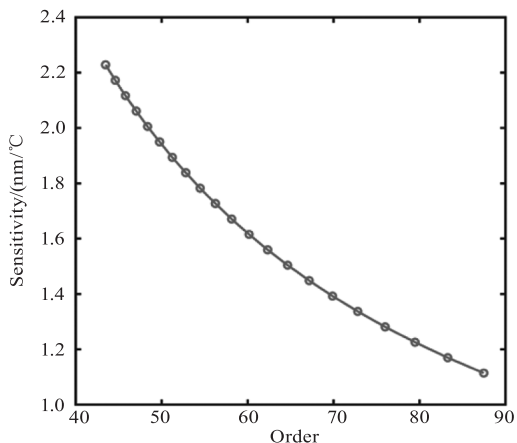


图4 FP腔传感器灵敏度随级次的变化关系

Fig. 4 The relationship between sensor sensitivity and orders

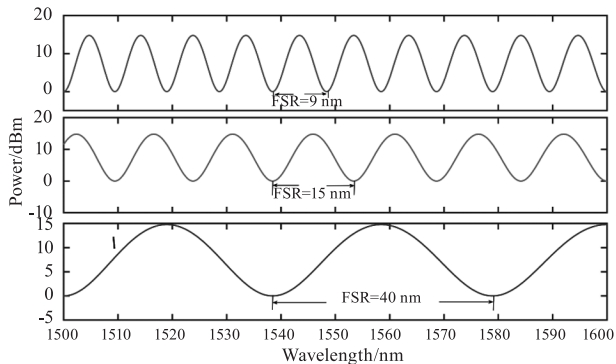


图5 不同腔长FP腔传感器的模拟干涉光谱

Fig. 5 Simulated interference spectra of sensors with different cavity lengths

### 3 实验装置及结果分析

为了证明基于超短腔FP型光纤温度传感器的大测量范围的可行性,对设计的光纤FP腔温度传感器进行实验特性研究,光纤FP腔传感器的温度特性测试系统如图6所示。将传感器与光纤光栅解调仪(Optical sensing demodulator, TV125)连接,来自解调仪(波长范围1510~1590 nm)的输入光经过单模光纤到达传感器,传感器的反射信号经单模光纤输入给解调仪,计算机(PC)与解调仪相连,用于观察传感器的反射光谱并记录数据。传感器置于精密超低温计量检定恒温槽(YM-CDC-R80)中,用于模拟低温环境,其温度控制精确度为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ,实验中光纤传感器的温度从 $-10^\circ\text{C}$ 变化至 $-40^\circ\text{C}$ ,期间每隔 $1^\circ\text{C}$ 对FPI传感器反射光谱进行一次采集。

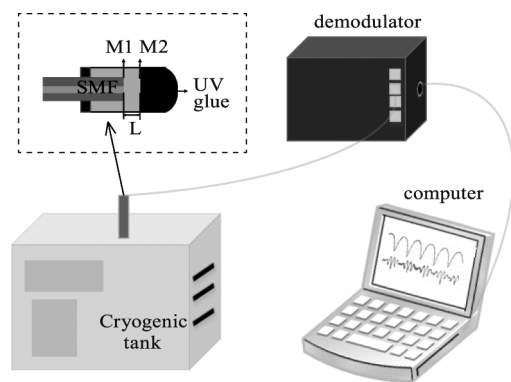


图6 光纤温度传感实验装置示意图

Fig. 6 Experimental setup for temperature sensing

为了进一步研究传感器的温度响应特性,对传感器做了升降温测试。图7显示了传感器降温过程中的反射光谱。由于光纤端面 and 聚合物端面反射率低的原因,反射光谱显示出双光束干涉的特性。从图中可以看出,在1510 nm和1590 nm之间,FP腔的自由谱FSR大于80 nm。而根据显微镜下测量的腔长,我们理论计算出的自由谱为85 nm。因此在保持传感器对温度高灵敏响应的同时,传感器可测量的温度范围也得到很大提高。当温度从 $-10^\circ\text{C}$ 降低至 $-40^\circ\text{C}$ 时,紫外胶发生热胀冷缩,腔的尺寸变长,传感器的反射光谱向波长较长的方向移动,位移约为61.195 nm。并且传感结构在降温过程中,传感器的光谱强度也发生了一定程度的变化。当温度从 $-10^\circ\text{C}$ 下降至 $-40^\circ\text{C}$ 时,反射光谱的强度增加了1.893 dBm,这跟聚合物表面曲率的变化有关,温度的变化导致聚合物表面发生凹凸变化,对谐振

腔内端面的反射率产生影响,引起传感器强度发生变化。

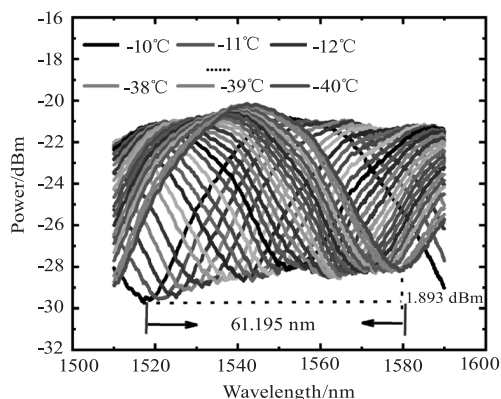


图7 -10℃~-40℃降温过程中FPI的反射光谱温度响应特性

Fig.7 Response of FPI to temperature during cooling at -10℃~-40℃

采用线性回归方法拟合降温测量所得数据,结果如图8所示。该传感器的温度灵敏度约为-2.066 nm/℃,相关系数 $R^2=0.962$ ,表明传感器反射波谷中心波长漂移量与温度之间存在线性关系。影响传感器腔长和反射波波谷中心波长线性度的主要因素是填充聚合物的特性,因为当温度在大范围区间变化时,紫外胶的热膨胀系数在大范围内不稳定。图9显示了传感器升温过程中的反射光谱特性。当温度从-40℃升高至-10℃时,反射光谱向短波方向漂移了60.006 nm,并且反射光谱的强度相应地降低了2.311 dBm。图10是升温过程中传感器反射波波谷中心波长与温度的拟合曲线。可以看出,传感器温度灵敏度为-2.021 nm/℃,线性拟合度为0.969。同时,对比升降温过程中同一温度下波谷的中心波长,可看出该传感器具有良好的重复性。

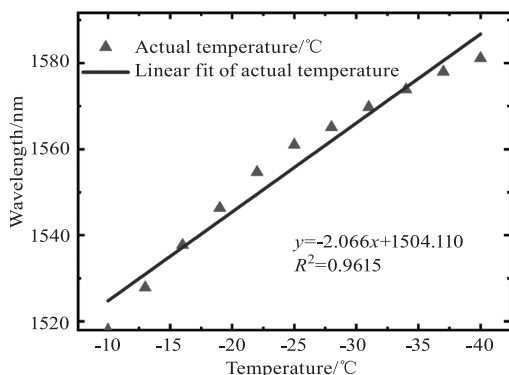


图8 降温过程中波谷中心波长与温度的拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of dip center wavelength and temperature during cooling

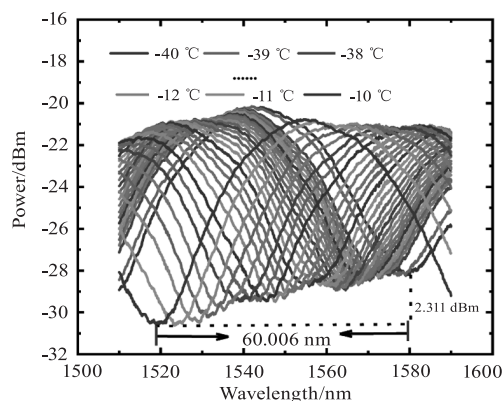


图9 -40℃~-10℃升温过程中FPI的反射光谱温度响应特性

Fig.9 Response of FPI to temperature during heating at -40℃~-10℃

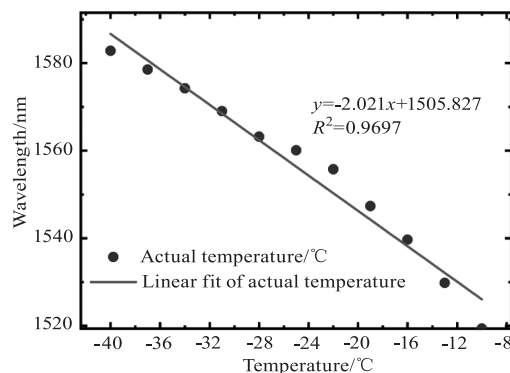


图10 升温过程中波谷中心波长与温度的拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of dip center wavelength and temperature during heating

#### 4 结论

本文通过制作超短腔来扩大光纤FP腔温度传感器的测温范围,研制了一种结构紧凑的探针反射型光纤温度传感器。详细介绍了传感器的制造工艺和工作原理。FP腔由石英毛细管中的聚合物和单模光纤构成。精确控制聚合物端面 and 单模光纤端面之间的长度,使得FP腔具有超大的自由光谱区,因而可以测量更大的温度变化范围。实验验证了传感器样品的温度响应特性。实验结果表明,利用该方法获得的传感器,在-10~-40℃范围内,温度灵敏度为2.066 nm/℃,温度分辨率为 $\pm 0.0005$ ℃,其相应的温度测量范围较同灵敏度的光纤FP腔温度传感器得到扩展,该传感器结构紧凑(<1 cm),灵敏度高且可灵活调节,可望应用于工业生产和冻土区路基等温度检测领域。

#### 参考文献:

- [1] Li Degui, Feng Jun, Wang Mingxu, et al. Composite inter-

- ferometric optical temperature sensor based on tapered-SMF-TCD-spherical structure [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2020, 31(3): 230 – 236. (in Chinese)
- 李德贵, 冯珺, 王明旭, 等. 锥-单模光纤-细芯光纤-球结构的复合干涉型传感器温度特性研究[J]. *光电子激光*, 2020, 31(3): 230 – 236.
- [2] Feng Wenlin, Peng Jin, Yu Jiahao, et al. Double fabry-pérot fiber optic temperature sensor based on end face corrosion[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(4): 767 – 770. (in Chinese)
- 冯文林, 彭进, 余佳浩, 等. 端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4): 767 – 770.
- [3] Shen Jiaxin, Wang Wei, Zhao Qiong, et al. A fiber grating and fabry-perot microcavity sensor for temperature and strain measurement[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(2): 16 – 20. (in Chinese)
- 申佳鑫, 王伟, 赵琼, 等. 光纤光栅与法珀微腔温度应变双参量传感器[J]. *激光杂志*, 2021, 42(2): 16 – 20.
- [4] Liu Fulu, Zhang Yumin, Meng Fanyong, et al. Fiber temperature sensor based on the cascaded fabry-perot with end face coating and substrate sensitization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 106 – 111. (in Chinese)
- 刘福禄, 张钰民, 孟凡勇, 等. 基于端面镀膜和基底增敏的级联法布里-珀罗光纤温度传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 106 – 111.
- [5] Zhang Wen, Meng Fanyong, Song Yanming, et al. Research on the cascaded fiber F-P cavity fabricated by femtosecond laser with FBG and its sensing characterization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(9): 2194 – 2199. (in Chinese)
- 张雯, 孟凡勇, 宋言明, 等. 飞秒刻写光纤 F-P 腔级联 FBG 传感特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(9): 2194 – 2199.
- [6] Liang Weilong, Zhou Chiming, Fan Dian, et al. Fiber-optic fabry-perot high-temperature sensor based on sapphire wafer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1228003 – 1 – 1228003 – 5. (in Chinese)
- 梁伟龙, 周次明, 范典, 等. 基于蓝宝石晶片的光纤法布里-珀罗高温传感器[J]. *光子学报*, 2016, 45(12): 1228003 – 1 – 1228003 – 5.
- [7] Wang Yingxun, Wang Caifeng, Wang Xiang, et al. Interferometric fiber optic temperature sensor with singmode fiber-multimode fiber-singlemode fiber structure[J]. *Low Temp. Phys. Lett*, 2019, 029(41): 0290 – 0296. (in Chinese)
- 王迎勋, 王彩峰, 王香, 等. 一种单模-多模-单模结构的干涉型光纤温度传感器[J]. *Low Temp. Phys. Lett*, 2019, 029(41): 0290 – 0296.
- [8] Duan Danyang, Cheng Jin, Gao Ran, et al. Temperature sensor based on optical fiber Fabry-Pérot interferometer[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(4): 124 – 127. (in Chinese)
- 段丹阳, 程进, 高然, 等. 基于光纤法布里-珀罗干涉仪的温度传感器[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(4): 124 – 127.
- [9] Li Songi, Zhang Xu, Lü Mingyang, et al. A high-sensitivity temperature sensor based on integrated dual-hole fiber fabry-perot Interferometer[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(4): 602 – 606. (in Chinese)
- 李松, 张徐, 吕明阳, 等. 双孔光纤集成 F-P 干涉仪的高灵敏度温度传感器[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(4): 602 – 606.
- [10] Zhao Qiong, Wang Wei, Kou Wanying, et al. Liquid-filled sensitivity-enhanced fabry-pérot microcavity fiber-optic temperature sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(7): 857 – 861. (in Chinese)
- 赵琼, 王伟, 寇婉莹, 等. 液体填充增敏型法布里-珀罗微腔光纤温度传感器[J]. *激光与红外*, 2020, 50(7): 857 – 861.
- [11] Gao Xiaodan, Peng Jiankun. Study on high temperature characteristics of F-P fiber temperature sensor based on sensitive film[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(1): 25 – 34. (in Chinese)
- 高晓丹, 彭建坤. 基于敏感薄膜的 F-P 光纤温度传感器的高温特性[J]. *半导体光电*, 2020, 41(1): 25 – 34.
- [12] Rao Yunjiang, Chen Yihuai, Wu Yu, et al. Microfiber ring resonator temperature sensor[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(3): 385 – 387. (in Chinese)
- 饶云江, 陈一槐, 吴宇, 等. 微光纤环形谐振腔温度传感器[J]. *电子科技大学学报*, 2012, 41(3): 385 – 387.
- [13] Gu Jinyu, Quan Lei, Liu Jinrong, et al. Sensitivity enhancement method for oil-sealed fiber fabry-perot temperature sensor[J]. *Journal of North University of China: Natural Science Edition*, 2018, 39(3): 363 – 366. (in Chinese)
- 谷瑾瑜, 全磊, 刘晋荣, 等. 基于油封方法的光纤 FP 温度传感器增敏技术研究[J]. *中北大学学报: 自然科学*

- 版,2018,39(3):363-366.
- [14] Hao Jiaqi, Zhang Wen, He Wei, et al. Three-beam interferometric optical fiber fabry-perot structure and its dual-parameter testing[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(12):23-27. (in Chinese)  
郝家祺,张雯,何巍,等. 三光束干涉光纤法布里珀罗结构及其双参数测试研究[J]. 中国测试, 2020, 46(12):23-27.
- [15] Gao Chunhong, Tang Caijie, Lan Tian, et al. Review of high-temperature fiber-optic fabry-perot pressure sensors [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020, (12):27-31. (in Chinese)  
高春红,唐才杰,蓝天,等. 高温光纤法珀压力传感器研究进展[J]. 仪表技术与传感器, 2020, (12):27-31.
- [16] Joel V, Vittoria F, Gianluca C, et al. Photonic-crystal-fiber-enabled micro-fabry-perot Interferometer [J]. Optics Letters, 2009, 34(16):2441-2443.
- [17] Jiang X G, Daru C. Low-cost fiber-tip fabry-perot interferometer and its application for transverse load sensing[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2014, (48):104-108.
- [18] Gao Meiling, Jin Kezi, Song Ronghe, et al. High sensitivity temperature self-calibration optical fiber magnetic field sensor[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2021, 51(3):498-504. (in Chinese)  
高美玲,金可臻,宋荣和,等. 高灵敏度温度自校准型光纤磁场传感器[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2021, 51(3):498-504.
- [19] Fang Yitao, He Wei, Zhang Wen, et al. Research on temperature sensing characteristic of all fiber liquid cavity fabry-perot structure[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(4):476-480. (in Chinese)  
房一涛,何巍,张雯,等. 采用液体腔的全光纤 Fabry-Perot 结构温度传感特性研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(4):476-480.
- [20] Yang Yi, Xu Ben, Liu Yaming, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic fabry-perot interferometer based on vernier effect[J]. Acta Phys. Sin, 2017, 66(9):094205-1-094205-7. (in Chinese)  
杨易,徐贲,刘亚铭,等. 基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器[J]. 物理学报, 2017, 66(9):094205-1-094205-7.